

国家自然科学基金  
国家科委863高技术 资助项目

# 机器人学

## 智能机器人传感技术

● 张福学 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

www.ai.bbt.com □□□□□□

71-41  
12

# 机器人学

## 智能机器人传感技术

国家自然科学基金  
国家科委 863 高技术 资助项目

张福学 编著



电子工业出版社

9710068

003-20

## 内 容 简 介

本书深入系统地论述了各类智能机器人传感器的原理、结构、性能,以及信号处理和应用技术,是我国第一部全面论述智能机器人传感技术的专著。全书共四编,计 27 章。第一编论述机器人触觉,计 14 章,包括动觉、触觉、滑觉、接近觉、热觉,以及信号处理和感知数据融合技术等。第二编论述机器人非触觉,计 8 章,包括温度、距离、线速度和线加速度、力和转矩、角速度和角度,以及姿态传感器。第三编论述机器人语言与听觉,计 3 章,包括机器人语言、听觉器官和人机接口技术。第四编论述机器人视觉,计 2 章,即图像技术和计算机视觉。

本书可供研究、生产和应用传感器的科技人员参考,适用于从事机器人和自动化研究的工程师和科学家,亦可用作高等院校仪器仪表与测量、自动控制、惯性技术、计算机应用、电子材料与元器件、无线电技术、生物医学等专业的研究生和本科生的教学用书。

## 机器人学

### 智能机器人传感技术

张福学 编著

责任编辑 龚兰方

\*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

电子工业出版社计算机排版室排版

北京市顺义县李史山胶印厂印刷

\*

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:15 插页:1 字数:386 千字

1996 年 9 月第一版 1996 年 9 月第 1 次印刷

印数:3000 册 定价:23.80 元

ISBN 7-5053-3186-8/TN·886

000000

## 前 言

机器人学是一门边缘学科,它涉及电子精密机械、空间机构学、操纵动力学、人机工程学、生物学、控制与惯导系统、传感技术、计算机系统、人工智能和系统工程。由于机器人学的领域十分广泛,因此,虽然近年来国内外出版了许多机器人的书,但很难从一本书中了解机器人的全貌。为了弥补已有著作的不足,作者结合自己的科研教学工作,以“机器人学”命名分别撰写了《智能机器人传感技术》和《机器人集成方法、自动机械设计技巧、机器人应用》两本专著,试图以此对我国正在形成的“机器人热”起到加温作用。

本书是在作者领导的研究所完成多项国家科委和国家自然科学基金委员会“863”高技术项目的基础上,参阅了国内外有代表性的著作,在国家自然科学基金委员会和国家科委“863”机器人传感器实验室支持下完成的。北京信息工程学院肖航撰写了第二十二章中 22.1~22.4 初稿,李擎撰写了第八章中 8.6,陈占先、李邓化和刘献强参与撰写第十九章中 19.12 和第二十二章中 22.5,其中反映了他(她)们的科研成果。电子工业部第二十六研究所刘一声和航天工业部 200 厂李耀宗两位高级工程师提供了国外机器人方面的译文。张欣中和周维真两位教授审阅了第二十六和第二十七章,彭光泉教授审阅了第十九、二十一和二十二章。参与审校的人员有郝建德、胡信裕、欧国银、翟澍龙、段守禄、甘荃、李英伟、刘国安、张星泉、苏中、何召文、王海东、张伟、张磊、王丽坤、李万忠、夏颂、刘健宁、任宏超、吴建义、缪镭、田运志、罗先正和王秀奎等,全书由张福学教授统稿。在本书即将出版之际,对以上各位付出的辛勤劳动,特别是对蒋国松院士给予的指导和具体帮助表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,必有谬误之处,恳请读者批评指正!

张福学



## 作者简介

张福学(1939-)云南宣威人。1961年云南大学物理系毕业。历任电子工业部四川压电与声光技术研究所副所长、高级工程师。北京信息工程学院传感器电子学研究所所长、教授。四川省委和省政府科技顾问,北京市人民政府专业技术顾问。中国惯性技术学会第一、二、三届理事,中国电子学会和国际电气电子工程师学会(IEEE)高级会员。美国科学促进会会员,美国纽约科学院院士,美国名人传记学会理事会、执行理事会和出版委员会科学顾问。南京航空航天大学兼职教授,电子工业部北京真空电子技术研究所兼职教授、博士研究生导师。全国总工会第九届候补执行委员和第十届执行委员。他首先提出“气体摆”新原理,根据这一原理发明了气体摆式倾角传感器和气体线加速度传感器。以他为首研制成功的压电晶体速率陀螺和压电射流速率传感器等惯性器件,在航空、航天、舰船、兵器 and 机器人等技术领域广泛应用。对生物压电性进行了深入研究,提出“人体由电偶极子组成,在电场作用下电偶极子转向电场方向并沿电场方向移动,……”的学术观点。根据这一观点发明的电场治疗仪能缩短骨折愈合期的  $1/3 \sim 1/2$ , 治疗陈旧性骨折、骨不连、软组织损伤、颈椎病、肩肘炎、关节炎疗效显著,被誉为“张氏治疗仪”,产品出口到德国、瑞典、印度、意大利、加拿大、新加坡、美国、阿根廷、香港、台湾等国家和地区。先后获国家发明奖和科技进步奖六项,部委级科技进步奖二十项,中、英、美发明专利十项。在国内外 34 种刊物上发表文章 232 篇。主要著作十九部书,其中《压电学》(上下册)评选为全国优秀科技图书。培养博士生 3 人,硕士生 13 人。1978 年全国科学大会授予“全国科技先进工作者”称号,1979 年国务院授予“全国劳动模范”称号,1984 年国家人

事部授予国家级“中青年有突出贡献专家”称号,1991年获国务院的政府特殊津贴证书。先后被编入《中国科技人物辞典》、《中国工程师名人大全》、《中国人名词典》、《世界科技名人录》和《世界名人录》。

## 主 要 著 作

1. 《压电晶体陀螺》
2. 《压电晶体力和加速度传感器》
3. 《压电学》(上下册)
4. 《压电铁电应用》
5. 《实用传感器手册》
6. 《传感器电子学及其应用》
7. 《传感器敏感元器件大全》
8. 《传感器电子学》
9. 《可靠性工学》
10. 《传感器实用电路 150 例》
11. 《传感器应用及其电路精选》(上下册)
12. 《英汉传感技术辞典》
13. 《日汉传感技术辞典》
14. 《传感器敏感元器件实用指南》
15. 《机器人学》——智能机器人传感技术

# 目 录

第一编 机器人触觉 .....	(1)
第一章 机器人触觉概论 .....	(1)
1.1 概述 .....	(1)
1.2 人体触觉敏感 .....	(4)
1.3 传感器和换能器 .....	(10)
第二章 机器人关节部位敏感线位移和角位移的 非光学动觉传感器 .....	(21)
2.1 机器人动觉传感器 .....	(21)
2.2 电阻式电位计 .....	(23)
2.3 电容式电位计 .....	(26)
2.4 自动同步机 .....	(26)
2.5 解析器 .....	(29)
2.6 Motornetics 解析器 .....	(35)
2.7 感应式传感器 .....	(37)
2.8 线性可变差接变压器 .....	(39)
2.9 气压传感器 .....	(41)
2.10 机械传感器 .....	(46)
第三章 机器人关节部位敏感线位移和角位移的 光学动觉传感器 .....	(47)
3.1 光学断续器 .....	(47)
3.2 光学编码器 .....	(49)
3.3 光学增量型编码器校准机器人 .....	(62)
3.4 增量型编码器导致的不稳定性 .....	(65)
第四章 触觉传感器 .....	(68)
4.1 力、压力和剪切力 .....	(68)

4.2	触觉传感器开关 .....	(69)
4.3	压阻 .....	(73)
4.4	压电聚合物 .....	(78)
4.5	光学 .....	(81)
4.6	磁 .....	(91)
4.7	超声 .....	(95)
4.8	电容 .....	(96)
4.9	电化学传感器 .....	(97)
4.10	典型触觉传感器 .....	(98)
<b>第五章</b>	<b>柔性触觉传感器 .....</b>	<b>(101)</b>
5.1	柔性对触觉传感器获取信息的影响 .....	(101)
5.2	获取三维表面信息的触觉传感器设计 .....	(102)
<b>第六章</b>	<b>接近觉传感器 .....</b>	<b>(112)</b>
6.1	生物触须 .....	(112)
6.2	工程触须 .....	(113)
6.3	接触接近觉传感器 .....	(118)
6.4	非接触接近觉传感器 .....	(119)
6.5	机器人弧焊传感器 .....	(133)
<b>第七章</b>	<b>滑觉传感器 .....</b>	<b>(138)</b>
7.1	受迫振荡滑觉传感器 .....	(139)
7.2	断续器型滑觉传感器 .....	(140)
7.3	滑觉敏感“指” .....	(141)
7.4	贝尔格莱德手掌滑觉传感器 .....	(142)
<b>第八章</b>	<b>热觉传感器 .....</b>	<b>(145)</b>
8.1	热觉传感器的设计 .....	(145)
8.2	热觉传感器的数学模型 .....	(146)
8.3	热觉传感器识别物体的热扩散率和热传导率 .....	(148)
8.4	热觉传感器分类材料 .....	(149)
8.5	阵列式热觉传感器 .....	(152)
8.6	水下热觉传感器 .....	(152)
<b>第九章</b>	<b>其他模式的触觉敏感 .....</b>	<b>(157)</b>

9.1 纹理传感器 .....	(157)
9.2 电导率传感器 .....	(158)
9.3 通过耦合振动敏感接触 .....	(159)
<b>第十章 触觉和机动性 .....</b>	<b>(161)</b>
10.1 用于抓握的机器人手 .....	(161)
10.2 机器人手指数的确定 .....	(162)
10.3 人手 .....	(163)
10.4 灵巧机器人手和抓爪 .....	(164)
10.5 斯坦福灵巧手 .....	(165)
10.6 Utah-MIT 灵巧手 .....	(167)
10.7 Monash 灵巧抓爪 .....	(168)
<b>第十一章 左后触能级的触觉反馈 .....</b>	<b>(171)</b>

<b>第十五章 温度传感器</b> .....	(208)
15.1 电现象型温度传感器 .....	(208)
15.2 热膨胀现象型温度传感器 .....	(209)
15.3 光现象型温度传感器 .....	(210)
<b>第十六章 检测物体有无的传感器</b> .....	(212)
16.1 检测物体有无的传感器用途 .....	(212)
16.2 检测物体有无的光传感器 .....	(213)
16.3 检测物体有无的气压传感器 .....	(213)
16.4 检测物体有无的机电传感器 .....	(214)
<b>第十七章 距离传感技术</b> .....	(216)
17.1 利用三角测量方法的距离传感技术 .....	(216)
17.2 利用结构光方法的距离传感器技术 .....	(217)
17.3 渡越时间距离探测器 .....	(220)
<b>第十八章 速度和流速传感器</b> .....	(224)
18.1 直流转速表 .....	(224)
18.2 用光学编码器测量速度 .....	(226)
18.3 流速传感器 .....	(228)
<b>第十九章 线加速度传感器</b> .....	(232)
19.1 线加速度传感器的原理 .....	(232)
19.2 线位移式加速度传感器 .....	(233)
19.3 摆锤式加速度传感器 .....	(237)
19.4 液体摆式加速度传感器 .....	(241)
19.5 金属挠性加速度传感器 .....	(242)
19.6 石英挠性加速度传感器 .....	(243)
19.7 压阻式加速度传感器 .....	(246)
19.8 压电式加速度传感器 .....	(252)
19.9 光测弹性效应激光加速度传感器 .....	(253)
19.10 光纤加速度传感器 .....	(254)
19.11 振弦式加速度传感器 .....	(256)
19.12 气流式线性加速度传感器 .....	(257)
<b>第二十章 力和转矩传感器</b> .....	(261)



20.1	通过监控电动机电流感知力 .....	(261)
20.2	应变计力敏传感器 .....	(262)
20.3	电位计式力敏传感器 .....	(268)
20.4	膜片式压力传感器 .....	(269)
20.5	电感式压力传感器 .....	(269)
20.6	电容式压力传感器 .....	(270)
20.7	力平衡式压力传感器 .....	(270)
20.8	电感式转矩传感器 .....	(271)
20.9	腕力传感器 .....	(272)
20.10	柔性和装配操作 .....	(275)
<b>第二十一章 陀螺</b> .....		(280)
21.1	框架式陀螺 .....	(280)
21.2	挠性陀螺 .....	(283)
21.3	动力调谐式挠性陀螺 .....	(284)
21.4	静电陀螺 .....	(286)
21.5	激光陀螺 .....	(289)
21.6	光纤陀螺 .....	(294)
21.7	振梁式压电陀螺 .....	(297)
21.8	压电射流陀螺 .....	(301)
21.9	半球谐振式陀螺 .....	(307)
21.10	微机械振动陀螺 .....	(309)
<b>第二十二章 姿态传感器</b> .....		(311)
22.1	惯性系统 .....	(311)
22.2	捷联式系统的基本方程 .....	(315)
22.3	机器人姿态传感器 .....	(320)
22.4	姿态传感器的构成 .....	(337)
22.5	气流式水平姿态传感器 .....	(342)
<b>第三编 机器人语言与听觉</b> .....		(350)
<b>第二十三章 机器人语言</b> .....		(351)
23.1	语音应答装置 .....	(351)
23.2	工作的程序化 .....	(352)

23.3	机器人语言的分类 .....	(353)
23.4	VAL 语言 .....	(354)
23.5	AL 语言 .....	(361)
<b>第二十四章 机器人的听觉器官.....</b>		<b>(375)</b>
24.1	人和机器人听觉器官的类比 .....	(375)
24.2	传感器 .....	(377)
24.3	拾音器 .....	(384)
24.4	送话器 .....	(386)
24.5	扬声器 .....	(388)
24.6	耳机 .....	(391)
<b>第二十五章 人机接口技术.....</b>		<b>(394)</b>
25.1	给机器人的指令方式 .....	(394)
25.2	机器人的工作环境示教系统 .....	(395)
25.3	语音识别技术 .....	(396)
25.4	自然语言系统 .....	(402)
<b>第四编 机器人视觉 .....</b>		<b>(407)</b>
<b>第二十六章 图像技术.....</b>		<b>(407)</b>
26.1	点式图像传感器 .....	(407)
26.2	线列式图像传感器 .....	(409)
26.3	平面传感器 .....	(410)
26.4	立体传感器 .....	(417)
26.5	图像显示 .....	(418)
26.6	硬件 .....	(421)
26.7	图像编码 .....	(423)
<b>第二十七章 计算机视觉.....</b>		<b>(431)</b>
27.1	物体识别和分类 .....	(431)
27.2	软件设计 .....	(445)
27.3	视觉训练和适应的需要 .....	(446)
27.4	工业视觉系统 .....	(446)
27.5	早期机器人视觉系统的实例 .....	(448)
<b>参考文献.....</b>		<b>(464)</b>

# 第一编

# 机器人触觉

## 第一章 机器人触觉概论

### 1.1 概述<sup>[1~2]</sup>

#### 1.1.1 工业机器人需要反馈传感器

当今工业机器人无感知能力的居多。这些机器人的操作程序都是预先制定，并按照预定程序重复无误地完成确定的任务。它们缺乏适应性，只有当涉及的对象相同时，才能产生一致的结果。但是，通过预先制定的各种操作程序，可完成一系列任务。预先制定的程序包括喷漆、弧焊、造粒、机器维护、点焊、粘结、切割和组装等。

然而，许多机器人的应用需要感知，根据感知的信息改进计算机控制。利用这种感知的信息可做到：

(1) 随机安置物体的位置，从而降低购置固定夹具和夹紧装置所需的高额费用；

(2) 允许改变物体的形状。一个物体只需要制成预定用途要求的精度，而不必制成符合自动化装配需求的高精度，也不需要高价地制造 0.1mm 精度的载体。机器人可通过计算法定位用螺

栓栓住物体。例如，桔子和蛋等食品，其形状和尺寸是变动的，通过触觉传感器感知的信息，机器人可抓住它；

(3) 防止发生意外事故。例如，自动导向的车辆(AGV)式机器人，在道路上不能撞到人；

(4) 在错误条件下有智能功能。例如，一个螺母不能跟螺丝啮合，在装配前设法更换另外的螺母；

(5) 控制质量。机器人传感器能监控所操纵工件的质量，例如，检查出有毛病的工件。

除听觉、味觉和嗅觉外，感知形式可分成接触传感器和非接触传感器。

### 1.1.2 接触和非接触传感器的对比

非接触传感器检测机器人周围的声波、光和其他电磁波，以及电、磁和静电场之间的互作用。

视觉是人类最重要的感觉，在机器人敏感技术领域，主要研究计算机视觉。视觉系统在敏感技术中最复杂，它在工业中有相当广泛的应用。

包括人类在内的许多动物能很好地利用触觉信息，他们通过跟外部物体的物理接触获得信息。触觉敏感不受眼力、外部光照、物体的材料组成或表面抛光等影响。人类利用触觉信息保持人体姿态、感知危险警告，以及监控步行和抓握物体。许多无脊椎动物和夜间觅食动物都有高度发达的触觉敏感能力，所以它们能捕食需要的动物和避开危险。显然，机器人也可通过触觉提高自身功能。

触觉敏感有不同定义，R. Andrew Russell 将触觉敏感定义为“传感器和外部物体之间有物理接触的敏感”<sup>[1]</sup>。

### 1.1.3 机器人触觉传感器的应用

许多从事操作和装配任务的机器人，它们通过触觉敏感信息

均可提高自身功能。举起一个物体时,通过触觉敏感可及时检测开始时发生的滑动,以便采取正确的操作。移动中的几个物体处于极度接近时, +1mm 和 -1mm 间隙间的差别很难由视觉察觉,若采用合成力的方法进行监控,便可立即观察出这种差别。在视觉不起作用的有限空间,例如,装有硬币、钥匙、梳子和手绢的口袋中,要想从中找出硬币,通过触觉敏感便能探测和辨别出来。辨别物体的方法是通过触觉确定物体的性能,这些性能包括:(1)重量;(2)温度;(3)制作物体用材料的热性能;(4)可塑性、回弹性和物体表面的摩擦系数;(5)电导率;(6)表面纹理。其他诸如位置、方向、尺寸和表面形状等性能可通过视觉或触觉检测。触觉敏感亦可提供机器人手(或抓手)跟被操纵物体间有关力和转矩等信息。

#### 1.1.4 触觉敏感的内容

机器人和生物的触觉敏感需要功能相互联系的复杂蹊,故机器人必须考虑几者之间的互作用。人们希望设计“类皮肤”的触觉传感器,实际上,这种触觉传感器几乎无用。为了获取信息,触觉传感器应包含:(1)提供使传感器跟待检测物体接触的手段;(2)通过附加额外传感器确定触觉传感器的位置和取向;(3)实现获取和解释触觉信息的“智能”功能。因此,触觉敏感应考虑手爪、致动器、换能器、信息处理,以及触及人体、动物和机器的感觉。

当代机器人、远距离操作和人造器官的触觉敏感的发展水平远远落后于科学幻想影片中描绘的图像。因此,在识别物体和控制操作中,改进换能器,分析各种换能器的输出,以及使用获得的信息等方面,还需要进行大量的基础研究。

机器人若要走出组织有序的工厂,并在组织无序的环境中活动,它需要触觉、导航、操纵物体、自身保护和保护环境等信息。

## 1.2 人体触觉敏感

人的手有易抓住物体、操纵物体和确定物体的许多物理特性。这些功能都是通过感觉特别是触觉获得的信息来实现，如图 1.1 所示。

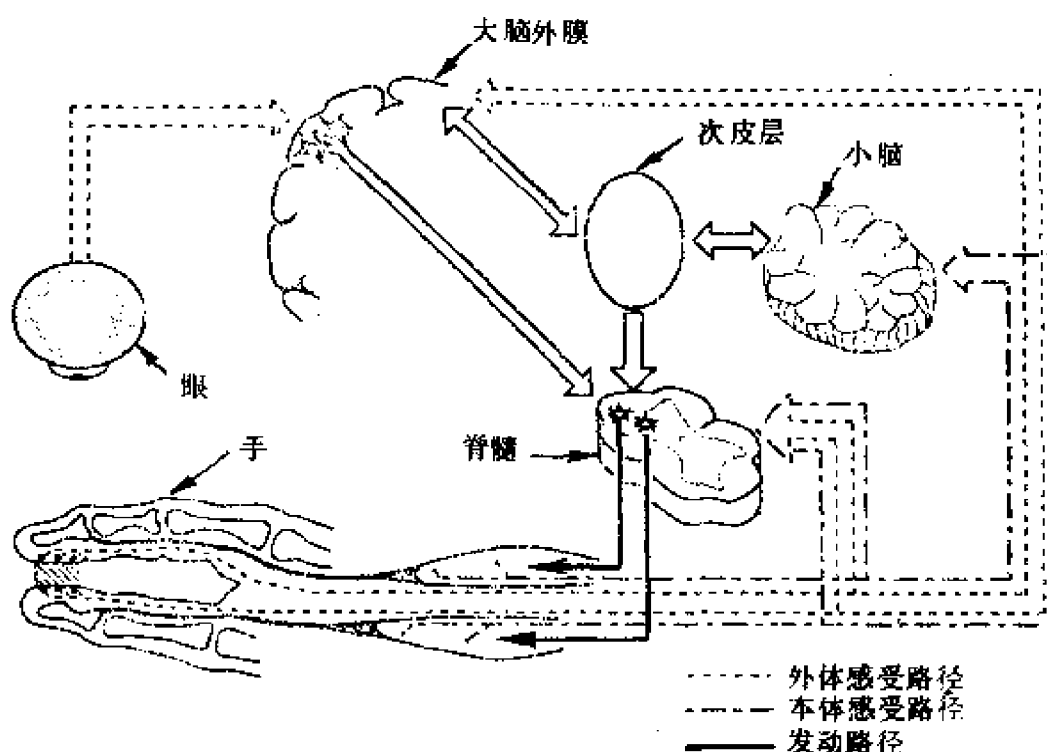


图 1.1 抓握和操作的感控

被抓物体跟手接触的部位及其性质通过皮肤上的传感器获得。手指的位置及其给物体施加的力，可通过肌肉中的神经末梢、筋和周围的软组织检测。在低级水平，脊髓通过感觉信息完成手的回复控制。这种回复能防止肌肉不自觉地伸展，故可帮助保持手的姿态。在高级水平，小脑、次皮层、大脑外膜逐渐进行极复杂的控制。大脑外膜能将复杂操作的漫长工作组织起来，亦可通过视觉增加触觉敏感功能。

在机器人触觉敏感中，我们试图仿效人体触觉敏感系统的某



些功能。为此，要求掌握人体触觉敏感及其功能的知识，但是，不可能短期内重现生物传感器的功能。可喜的是生物系统的存在和人自身的触觉经验有助于发展机器人触觉敏感。

人体有两种感觉系统能与外部物体接触而产生反应：(1) 内体感觉系统。该系统检测诸如手足关节角、肌肉扩张和肌肉拉紧等内部参量。机器人通过这些参量间接地与外部物体接触；(2) 外体感觉系统。该系统由于皮肤表面温度和形状的改变而产生反应，这些参量是直接接触外部物体的结果。

### 1.2.1 内体感觉传感器系统

传感器深入人体内部，即可检测人体动作。该系统能动态敏感肌肉、筋和关节的活动，检测结果告诉我们手足的位置和手足加给外部物体的力的大小。

四类传感器有动觉敏感功能，其中两类在肌肉纺锤体中。环螺旋状梢和花枝状梢响应肌肉纤维的被动伸展，如图 1.2 所示。这些神经末梢适应慢，有助于保持人体姿态。

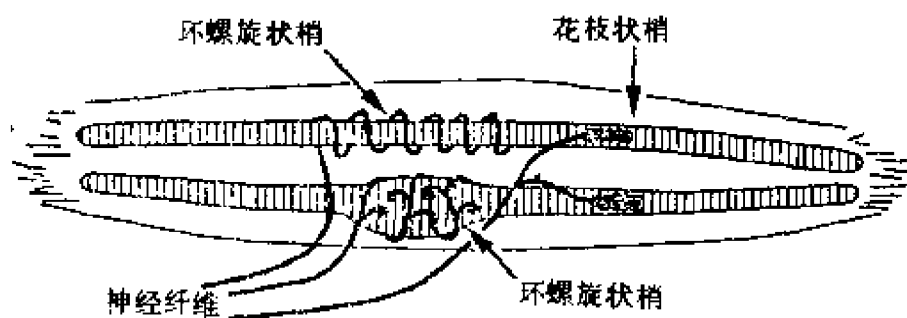


图 1.2 神经肌肉纺锤形体

肌肉拉紧通过肌肉腱中第三类神经末梢敏感，如图 1.3 所示。这种神经末梢响应肌肉拉紧。肌肉拉紧或者通过外力被动地产生，或者通过肌肉本身主动地产生。

第四类神经末梢在关节周围连续的软组织中，它可检测四肢关节移动的小角度。例如，它可以在 2s 内分辨出肩关节处约  $0.5^\circ$  的位移量。

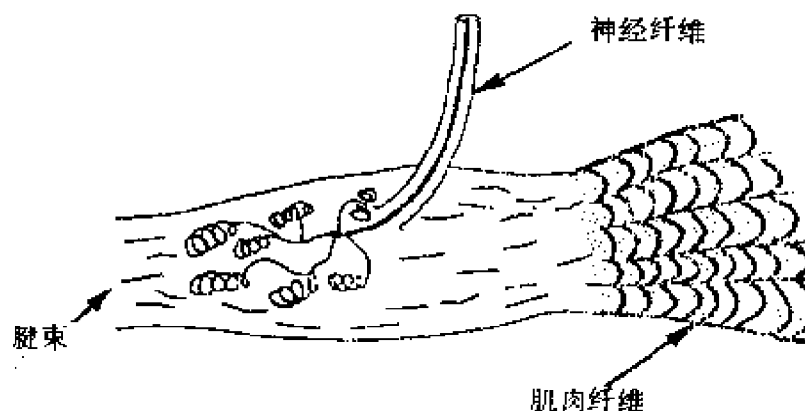


图 1.3 神经束的纺锤体

### 1.2.2 外体感觉传感器系统

皮肤由表皮层和真皮构成。前者是与手掌和手指的指纹小乳头状沟脊相结合的最外层保护层；后者位于表皮层与皮下组织的较深层和脂肪层之间。外体感觉传感器系统的神经末梢封闭在真皮和表皮层之间，它由许多特种神经末梢构成。皮肤能直接响应接触压力、温度和疼痛。图 1.4 示出覆盖在手指和手掌上的无发皮肤外层的神经系统。

通过与外部物体接触记录皮肤形变的传感器有四种类型。Meissner 和 Merkel 末梢位于皮肤表面近旁，它们的空间分辨率高。在手的指纹皮肤中，Meissner 末梢位于真皮的小乳头状脊之间，而 Merkel 末梢则位于这些脊的端头。Pacinian 细胞和 Ruffini 末梢深埋在皮肤下面，故它们的接收范围宽。另外，高阈值的自由神经末梢响应疼痛和可能发生的有害刺激（如针刺）。表 1.1 列出四种不同类型传感器的性能。

除了疼痛信号外，当一个稳定刺激的强度随时间减小时，所有的神经末梢呈现出适应性。适应性的精确率影响每种感应器的频率响应。在冷水中浸泡几分钟后，就不会感觉到水象开始时那样冷，这是因为发出信号的神经末梢对温度已适应。温度由两类传感器传递，一类对“冷”起反应，另一类则对“温暖”产生反应

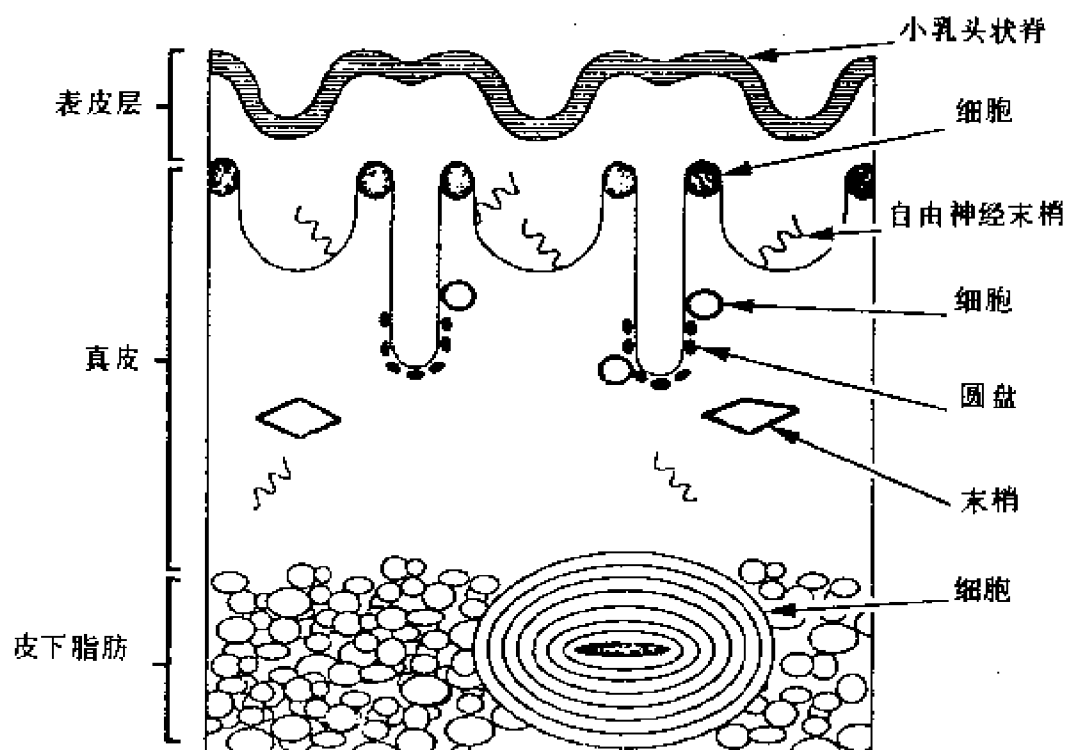


图 1.4 手指指纹皮肤的神经系统

(见表 1.2)。

表 1.1 痛觉阈值以下响应皮肤微小形变的某些神经末梢的性能

神经末梢	敏感范围(mm)	振动响应(Hz)	激励源
Meissner	3—4	8—64	组织、正常力
Merkel	3—4	2—32	形状、边缘、组织
Pacinian	10	64—400	振动
Ruffini		1—16	横向皮肤伸展

表 1.2 响应温度的某些神经末梢的性能

神经末梢	温度范围(℃)	激励源
Kraus	18—40	冷
Ruffini	40	温暖(正常物体温度 37℃)

使特定神经纤维活化的激励源是围绕神经末梢的隔膜。神经末梢的形式类似自由神经末梢的裸神经，如 Merkel 圆盘之类有扩张尖端的末梢，或如 Pacinian 细胞之类的压缩末梢——影响感

受器响应机械激励源的动态范围。影响机械感受器响应的另一个因素是神经末梢接触周围组织结构的方式。

1.2.3 跟传感器雷同的人体毛发

覆盖皮肤表面的人体毛发,除了能保持人体热量外,还有接近觉传感器的功能。毛发的触觉极敏感,通过它可检测位置的微小变化,借助毛发腺胞周围的神经末梢网络还可传递信号,如图1.5所示。这些不被衣物覆盖的毛发,能敏感轻微的触觉或柔和的微风。

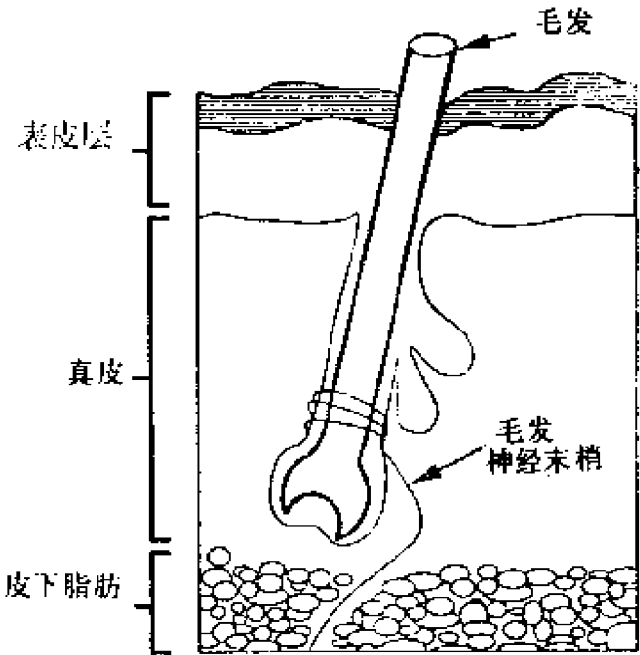
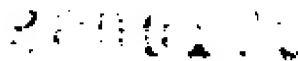


图 1.5 毛发腺胞的神经

皮肤是极易接近的人体部分,但其神经末梢敏感功能的详细情况尚不明了。有些神经末梢能响应一个以上激励,这就难以判断哪些神经末梢对于特定的敏感有所贡献。

1.2.4 触觉传感器的分布

触觉传感器分布在整个皮肤表面,但传感器分布密度差别极大。图1.6示出通过头脑左腔壁叶片截面的原理图,给出响应人





80gsm 复印纸的厚度约为 0.1mm。

(3) 你的左手放入 4℃ 水中，右手放入 40℃ 水中。当两手放入 20℃ 的水中时，左手感觉温暖而右手则感觉冷。

(4) 面部皮肤每秒可检测约 0.01℃ 的温度变化。

单个和成束的神经末梢跟其他神经连接，一直连接到脊髓。因此，皮肤的触觉数据没有神经处理。这跟眼睛相反，眼睛中光学神经纤维通过横向抑制完成边缘加强等处理工作。皮肤的物理结构和神经接触的位置使皮肤呈锯齿形，其边缘增强信息。人们对高级神经系统中有关触觉信息处理的知识还不多。

迄今，我们虽然对人体触觉敏感系统了解不够，但已有许多付诸实用的敏感技术。因此，研究机器人触觉，一方面要弄清人体触觉机理，同时要利用已有知识开发各种触觉传感器。

## 1.3 传感器和换能器

### 1.3.1 信息处理系统

信息处理系统包含如图 1.7 示的三部分

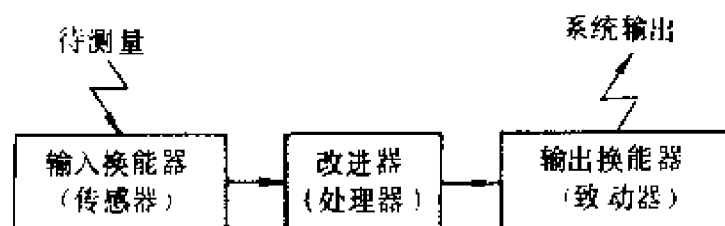


图 1.7 信息处理系统

通过输入换能器（即人们常称的传感器）获得信息，并将这种信息变换成跟处理器兼容的形式。经处理器处理后，信息变换成适合输出到外界的形式。因此，传感器是一种能将具有某种物理表现形式的信息变换成可以处理的输入换能器。机器人可认为是一种信息处理系统，该系统中输入换能器是一种安装在抓爪上的触觉传感器；处理器是控制机器人的计算机；致动器是跟机器人



伺服机构对应的输出系统。这样的系统能根据触觉传感器获得的信息改进机器人的运动。

信息是什么？Clande Shannon 根据信息理论的观点，认为信息是一种减少不确定量的量<sup>[1]</sup>。R. Andrew Russell 认为信息是增长人类知识的东西<sup>[2]</sup>。这是两种截然不同的解释，但他们对信息的观点并不矛盾，即信息的一个重要特性是，它能以一种能量形式或某种物质的表现形式单独存在。这意味着没有能量或物质的转移，便没有信息的转移。

### 1.3.2 信息载体

信息载体分以下六类：

(1) 辐射——涉及全频段的电磁波，范围包括无线电波到  $\gamma$  射线。辐射的主要参数是强度、频率、偏振和相位。

(2) 物理量——论述物质的各种外部参量，例如，位置、速度、尺寸、厚度、力和真空。

(3) 热——温度、温度梯度、热和熵。

(4) 电——电压、电流、电阻、电容等电参数。

(5) 磁——磁场强度、磁通密度和磁导率。

(6) 化学量——论述物质的内部结构的量。其主要参数是某一材料的浓度、晶体结构和凝聚态。

换能器应用物理效应在输入信号区和处理器信号区之间传送。表 1.3 列出一些固态物理效应，这些物理效应是将辐射、物理量、热、磁或化学量作为输入，从而产生电输出。

能完成信息处理的信号范围：

(1) 物理量——借助于流体成分的方法。流体成分的工作速度受流体中声速(约  $10^3\text{m/s}$ )限制；

(2) 电——应用电子电路。以半导体为基础的电路的工作速度，受半导体材料中载流子迁移率(约  $10^5\text{m/s}$ )的限制；

(3) 辐射——借助于光成分。速度受光波导中的光速(约

$10^4\text{m/s}$ )限制。

为了便于处理信号，传感器一般将非电信号变换成电信号。表 1.3 列出有电输出的物理效应的例子。图 1.8 示出光轴编码器中的能量变换。这里应注意：

- (a) 输入是轴的机械旋转；
- (b) 辅助能量源的光束通过机械旋转调制；
- (c) 调制光变换成电信号输出。

有时需要测量量的空间或时间导数。若选择可直接得到地点或时间导数的换能器，就能取代直接测量量。例如，为了测定轴的旋转速度，可通过轴编码器输出的时间导数来得到。另一方面，直流转速传感器可直接得到跟旋转速度成正比的输出。

表 1.3 电输出的固态物理效应

范 围	被测的物理量	静止态	梯 度	时间导数
辐 射	强 度 频 率 偏 振 相 位	光电效应 光导性 光介电效应	横 向 光 电 效 应	
物理量	力  速 度 尺 寸 位 置	压电效应 压 阻  依赖于电场的 位置		声电效应
热	温 度	温 度 依赖于材料的所有电性能	塞贝克效应 艾廷豪森 能斯脱效应	
磁	磁场强度	霍尔效应  磁 阻 超导体 苏耳效应 艾廷豪森 能斯脱效应		法拉第·亨利定律
化学	浓 度 晶体结构 凝聚条件	依赖于材料的所有电性能	伏打效应	氧化-还原 反应

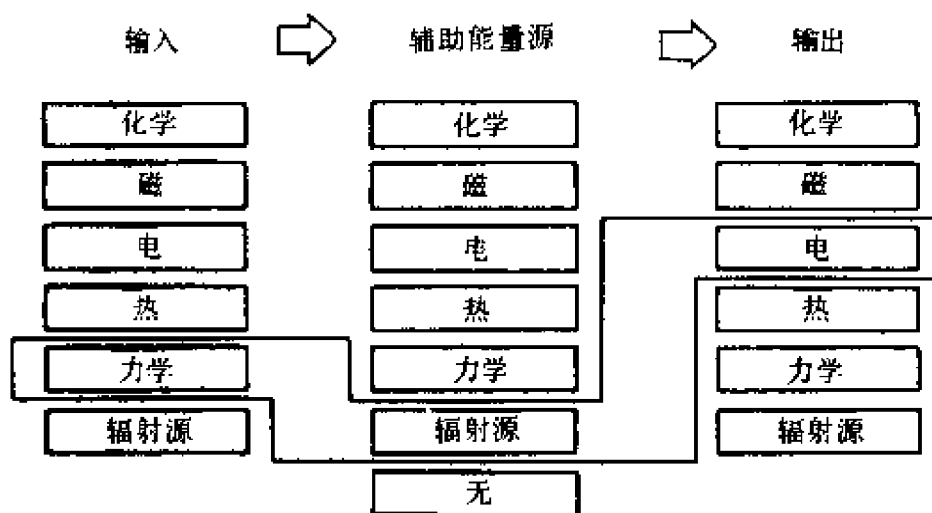


图 1.8 换能器内部的能量变换

### 1.3.3 特性和性能

传感器有如下几种类型：

(1) 自生型——来自输入信号的能量直接转换成输出信号。晒光电池即是自生型传感器。有些光度计含有一个跟特定刻度动圈式电表连接的晒光电池。这类传感器没有残留误差(零输入产生的零输出)，不需要辅助电源(适合低功率应用)。

(2) 调制型——主要能量供给不是输入信号，而是一个辅助能源。在应变计电桥中，机械应变改变电桥元件的电阻值。电流经电桥元件，产生输出信号——一种可变电压。调制传感器最适于检测弱信号。

(3) 绝对型——传感器的输出在任何时候都代表传感器的输入。这种传感器的典型例子是电位计。

(4) 增量型——传感器的输出仅代表传感器输入的改变，这些改变的积累才是真实传感器输入。使用传感器以前要求定标，以保证积累值跟真实传感器输入一致。增量型编码器是这类传感器的实例。

传感器的特性如下：

(1) 线性——若传感器输入/输出特性描绘在直线刻度上，则线性即是实测传感器输出偏离直线的程度。使直线接近传感器输出的方法：(a)由零输入的传感器输出和100%输入的传感器输出给出直线；(b)由适合最小二乘法的数据点给出直线。

(2) 滞后——传感器有滞后时，对于传感器输入某一特定值，传感器输出的变化取决于测量时传感器输入是增加还是减少。

(3) 重复性——传感器加上同样输入时，重复性即是指传感器输出中可变性的量度。重复性有时称精度。

(4) 分辨率——传感器输入中的最小变化在传感器输出中产生可检测的变化。

(5) 灵敏度——传感器输入的小变化导致传感器输出中对应的小变化。灵敏度是指输入变化除输出变化。

(6) 噪声——传感器输出中寄生信号的电平，它不是传感器输入所致。

通常，传感器信号将在离传感器一定距离处处理。这或许是由于传感器近旁的空间限制，或因为传感器周围的环境不适合灵敏的电子元件。热、冲击和振动都是损伤电子元件的一些因素。传感器信号的传输，尤其是传感器元件的大阵列中来的信号，需要特别注意传输。

#### 1.3.4 传感器寻址

为了得到皮肤敏感，必须在皮肤表面形成传感器阵列。人体皮肤中来自每个传感器(或传感器组)的神经直到脊椎骨为止不会突触，故每个传感器有一个数据通道。这种安排适合生物系统的工作，但不太适合人造皮肤。制作挠性人造皮肤有难以解决的技术问题，机器人手的人造关节通过许多布线存在物理问题。因此，通到传感器阵列的布线必须减到最少。

许多电容、压电和压阻触觉换能器都是两端器件，如图1.9所示。为了说明某些寻址线路图，一般假设传感器阵列含有这种

二端传感器。

每个传感器可通过一对扭紧的导线或同轴电缆跟外部电路连接，但对有电噪声干扰的应用还有问题。为了屏蔽

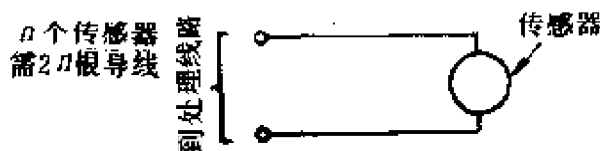


图 1.9 每个传感器有两根导线的传感器

寻址( $n$  个传感器需要导线  $= 2n$ )

干扰，必须对同轴电缆的外部进行屏蔽，或一对扭紧导线中的一根导线接地。两个传感器导线连接到一个平衡放大器即可抑制噪声。这种寻址线路图的缺点是需要大量的连接导线，例如，一个 100 个传感器阵列要求 200 根导线。

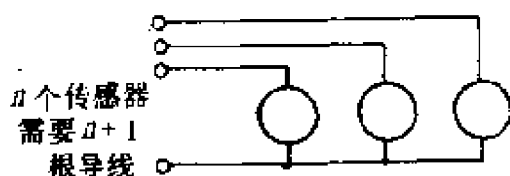


图 1.10 有一根公共线的传感器寻址

用一根导线连接每个传感器的公共级可减少连接导线数量，如图 1.10 所示。这样，一个 100 个传感器阵列只需要 101 根导线。压电传感器用这种

技术寻址，图 1.12 所示的“行列式矩阵”不适用。

分压器寻址 (图 1.11) 能跟压阻传感器在一起使用，在这种情形，导线的电阻相当高，导线电阻值可变 (在这种情况下一个 100 个传感器阵列，若只用一个分压器电路，则只需要 103 根导

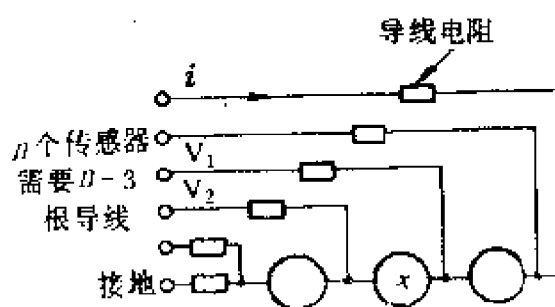


图 1.11 分压器电路

线)。已知电流  $i$  注入分压器。为了读出传感器元件  $x$  的电阻值  $r_x$ ，需要测量电位  $V_1$  和  $V_2$ 。通过元件  $x$  的电流为  $i$ ， $x$  两端的电位为  $V_1 - V_2$ ，该电位在电路中跟导线电阻值无关。因此，

$$r_x = (V_1 - V_2) / i \quad (1.1)$$

行列式矩阵寻址减少了连接导线, 如图 1.12 所示(一个 100 个传感器的阵列只需要 20 根导线)。除了换能器只在--个方向导通外, 寄生电导路径的影响使数据失真。若寄生电导路径的影响可忽略, 则

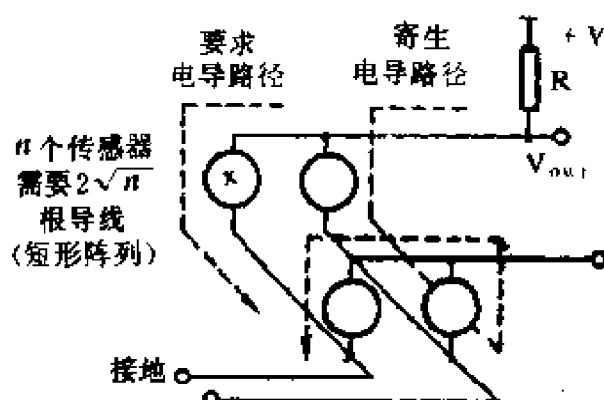


图 1.12 行列式矩阵

$$V_{out} = (V \cdot r_x) / (R + r_x) \quad (1.2)$$

行列式寻址中的寄生电导路径采用特殊电路可抵消。

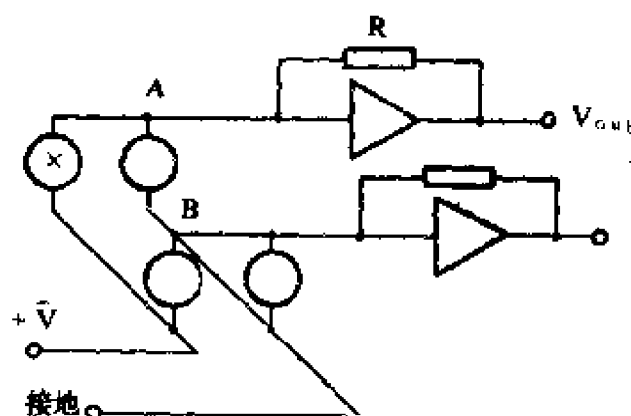


图 1.13 采用虚地消除寄生路径

图 1.13 中负反馈使得放大器 A 的输入值保持在地电位附近(假接地), 从而使寄生电导路径中无电流通过。因此, 传感器元件  $r_x$  的电阻

$$r_x = - (V \cdot R) / V_{out} \quad (1.3)$$

图 1.14 示出一种消除寄生电导路径的交替技术。一个单位增益放大器获取传感器输出电压 A, 并把该电压反馈到全部不用的纵列线。这就使 A 点的电位跟 B 点相同, 故寄生电导路径中无电流通过。通过式(1.2)可求出  $r_x$  值。

上述消除寄生电导路径的方法中, 后两种方法都需附加电



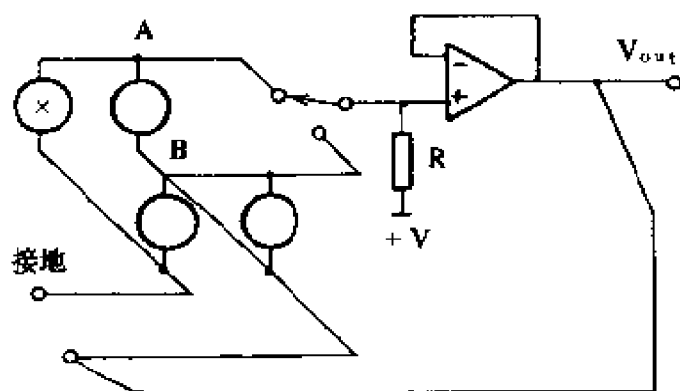


图 1.14 用保护位器消除寄生电导路径

路,但是,假如通到传感器阵列的导线与传感元件相比,其电阻可忽略,那么,寄生电导路径的问题就不存在。

### 1.3.5 智能传感器

电子元件装入传感器内,可减少跟传感器阵列有关的问题。若在传感器内集成电子元件,还可减少通到传感器的外部导线,并改进传感器性能。随着外加电路元件增多,形成了智能传感器。图 1.15 示出智能传感器阵列的一种可能结构。迄今,智能传感器还没有一般定义,但智能传感器应有下述功能:

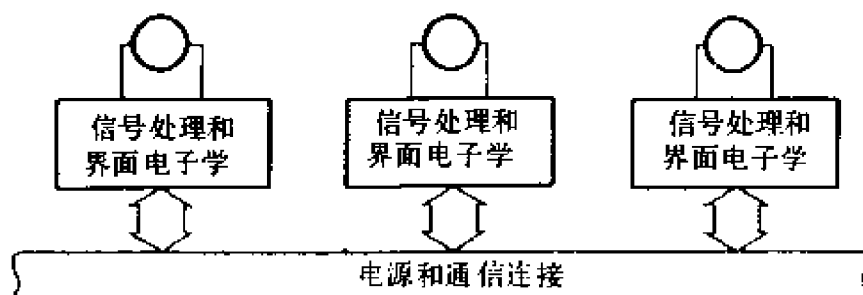


图 1.15 有智能传感器的分布计算

- (1) 双路通信——允许传感器按需要传输数据,并能遥控传感器的某些功能(如自校准);
- (2) 自校准——补偿长时间工作的传感器特性的变化;
- (3) 计算——补偿环境变化(如温度)和完成数据处理与简化,以便使传输信息最少(只传输传感器读出中重要的变化);

(1) 多重敏感——能同时测量一种以上物理或化学量。如人造皮肤传感器能测量物体的温度和加在皮肤上的压力。

如图 1.16 所示，加入二极管可改进智能传感器的性能。二极管通过阻塞寄生电导路径来减少传感器外部寻址电路的复杂性。

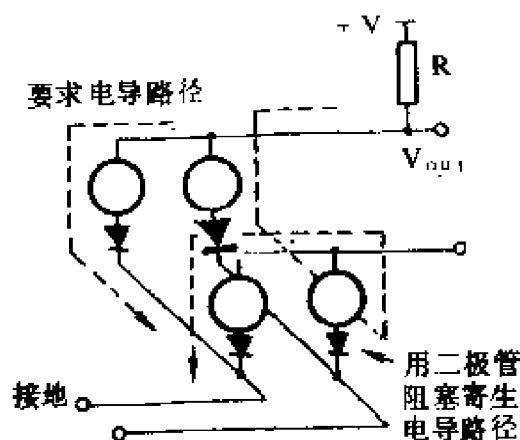


图 1.16 用二极管阻塞寄生电导路径

采用小型元件和混合电路结构技术，扫描传感器阵列的电路也能封装在传感器外壳内。图 1.17 的电路用一对级联约翰逊计数器扫描  $10 \times 10$  个传感器阵列的列和行。

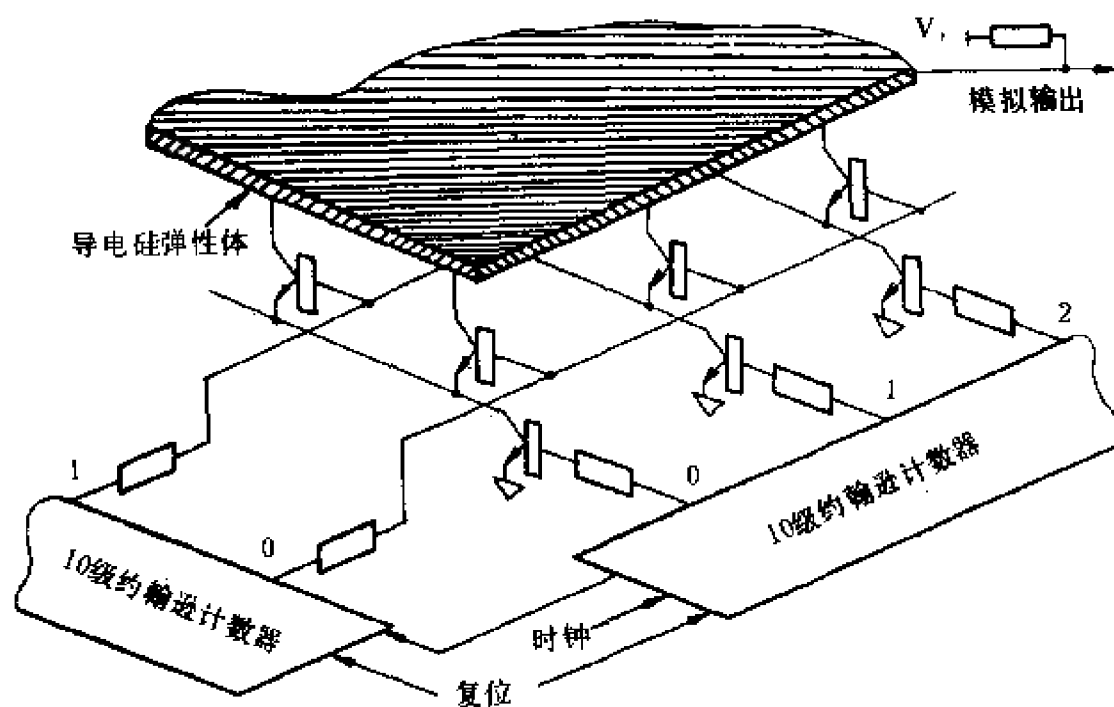


图 1.17 传感器扫描电路

传感器接触垫片直接连接到耦合晶体管与门电路，因此，每

个传感器垫片能依次接到地电位。这种传感器利用的换能器效应是接触电阻随正向力变化。这种可变接触电阻形成如图 1.18 所示的分压器。电阻 R 是垫片和弹性薄片边缘之间的固定电阻、在弹性薄片处形成公共连接。这种扫描电路和传感器只需五个接合处。

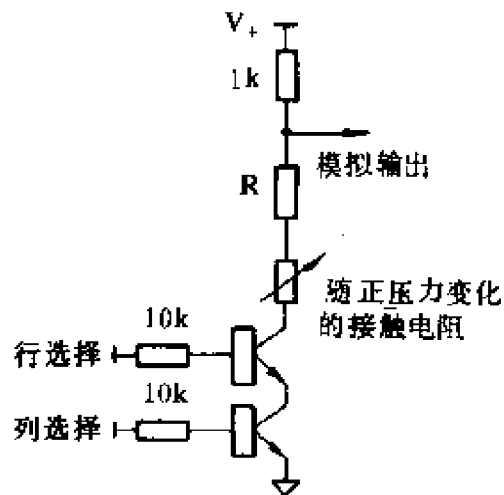


图 1.18 读出接触电阻

单片微型控制器是当前适用器件。这种微型控制器除了完整的微型计算机系统外，还有并行输入/输出线路、A/D(模拟-数字变换)变换器和 UARTS(通用异步接收机、发射机)。这些器件对提高智能传感器的“智力”有极大的潜力。

### 1.3.6 硅传感器

制作硅集成电路的技术已相当成熟，数字和模拟电路可制作在同一硅片上，敏感元件亦可跟电路元件制作在一起。

应用光电效应(光敏)、霍尔效应(磁敏)和压阻效应(力敏)的硅传感器已在工业等部门应用。功能电路和敏感元件集成在硅片上的传感器有下述优点：

- (1) 尺寸小，从而使传感器使用简便，且包装成本低；
- (2) 连接点少，从而降低包装成本，且提高可靠性；
- (3) 提高信噪比。通过放大弱信号消除长导线上传输低电平信号造成的噪声干扰；
- (4) 内部补偿。传感器的非线性、零位和零位漂移通过集成在硅传感器上的电路进行补偿；
- (5) 信号调节。在传感器传输信息前，完成模拟-数字变换、数据处理和数据简化；

图 1.19 示出用超大规模集成(VLSI)电路技术设计的触觉传感器实例，其功能如下：

(a) 能量转换。VLSI 基片表面有一对电极，该电极跟压力敏感塑料 (Dynacon B) 接触。电极间的电阻量度外部施加力的大小。将所有敏感元件调整到阈值，敏感元件便可产生二进制输出。

(b) 计算。数字电路根据每个元件提供的数据完成一些简单的数据处理；

(c) 通信。敏感元件的输出通过串联方式传送到集成电路的输出垫片上。

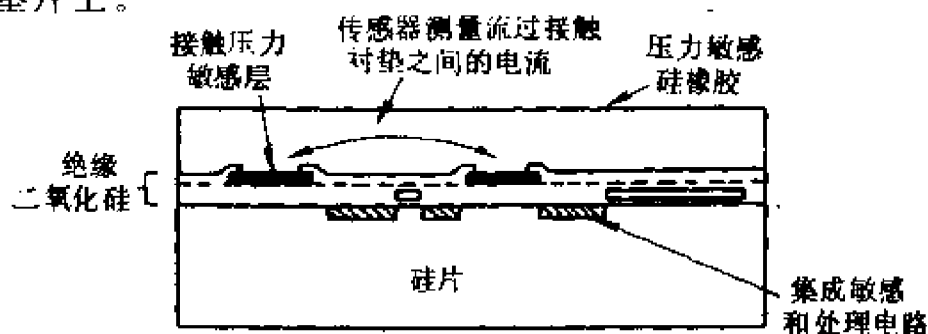


图 1.19 VLSI 电路触觉传感器的截面图

寻址大面积传感器阵列的问题采用硅集成传感器技术可以解决，但触觉敏感环境的问题有待解决。触觉传感器会遇到损害或环境干扰等因素的影响，环境因素包括冲击、磨损、切割、破裂、热、冷、湿度、磁场和电场。为了保护触觉传感器中的电路，必须远离传感器外表面安装电路。

## 第二章 机器人关节部位敏感 线位移和角位移的非光 学动觉传感器

### 2.1 机器人动觉传感器

敏感机器人手、臂等关节部位线位移、角位移，以及力和力矩的传感器，称机器人动觉传感器或机器人内态传感器。动觉传感器提供的信息使手、臂等按需要的方式工作。动觉传感器提供如下两种功能给运动触觉敏感系统：

(1) 敏感系统定位(位置和取向)。触觉传感器和外部物体之间建立物理接触时，敏感系统的定位能精确计算出接触点在地理坐标中的精确位置。这种触觉信息可定位物体的位置，描述有几种触觉的物体，它与机器人的位置变化无关。

(2) 感知力和力矩。通过测量机器人跟外部物体之间的接触引起的力和力矩可得到有许多用途的信息：(a)限制接触力，从而确保安全；(b)装配操作中抵消干扰和检测误差条件；(c)检测材料的摩擦性、柔性、可塑性和回弹性。

机器人动觉传感器除用于手、臂等关节部位外，还可用于机器人手爪，手爪通过控制器处理动觉传感器获取的信息实现智能操作。例如，若需要抓爪握住不同尺寸、重量、刚度的东西，如钢块、纸、鸡蛋等，则手爪需要通过机器人控制器处理动觉传感器敏感的力，将力调节到足以握住物体而不压碎物体的程度。

机器人对动觉传感器的要求是精度适当而成本低。动觉传感器用于机器人要考虑成本、功率、尺寸、分辨率和直接监控等。当

前,大多数动觉传感器还处于实验室水平,由于脆性和成本等原因,这种传感器还不能用于工业装配。

## 2.2 电阻式电位计

用于检测机器人关节位置的非光学动觉传感器主要有电位

计、自动同步机、解析器、同步分析器、线性可变差接变压器(LVDT)、气压传感器和机械传感器。这些敏感元器件有的是模拟式,有的是数字式。

测量位置的最简单器件是电阻式电位计,这种器件既可监控机器人转动关节的角度位置,又可监控棱柱形关节的线性位置,如图 2.1 所示。电阻  $R$  的两端加上直流电压  $V_s$  时,输出电压跟基准点  $a$  到滑动接点(或游标)的线性或旋转距离成比例,若游标和基准点之间的线圈电阻为  $r$ ,则输出电压

$$V_{out} = \frac{r}{R} V_s \quad (2.1)$$

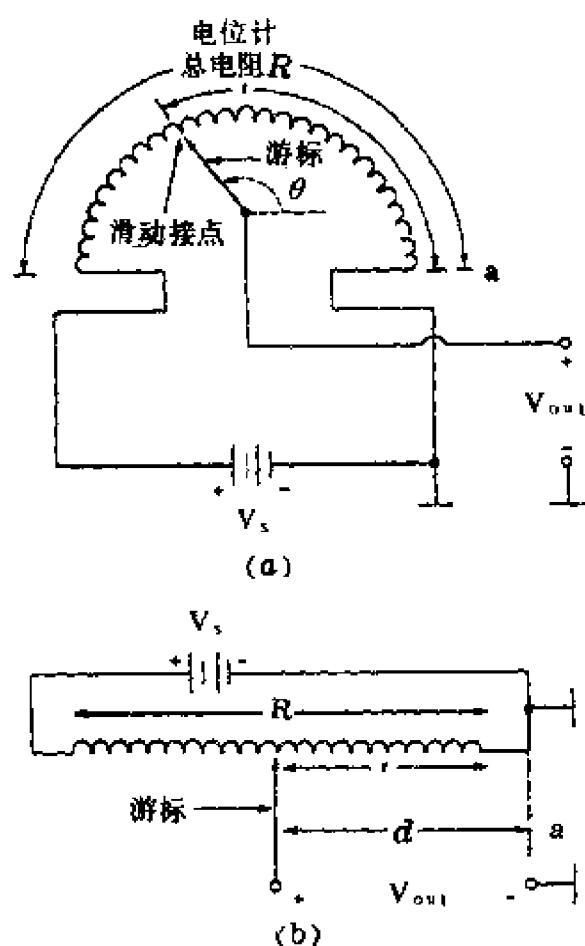
(a)输出与  $\theta$  成比例;

(b)输出与  $d$  成比例

图 2.1 线绕电阻式电位计

为了使电位计成为有用的位置传感器,电阻  $r$  与游标轴移动的角位移应成线性

关系。但通常这种线性关系存在某种偏移,如图 2.2 所示。电位计的非线性(用百分率表示)定义为偏离理想直线的最大偏移量与



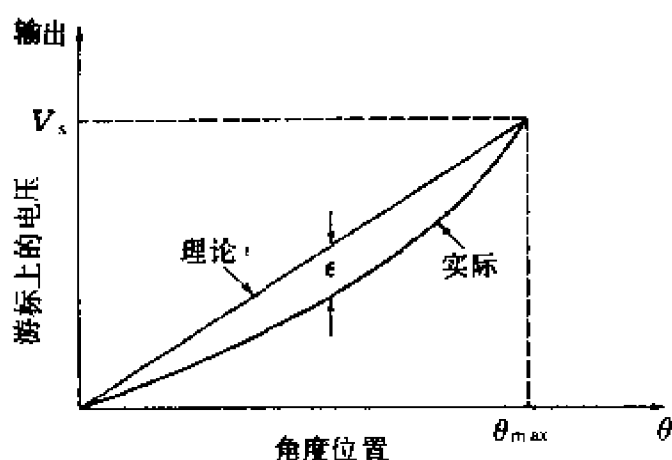


图 2.2 电位计理论线性和实际非线性特性

满刻度的输出之比，即

$$N.L. = 100 \frac{\epsilon}{V_s} \quad (2.2)$$

这种非线性，使其难以检测高精度系统。这种电位计仅用于精度不高的机器人，不宜用作位置监控器件。

电阻式电位计由于自身的缺陷限制了它在高精度位置测量中的应用。首先，游标跟线圈电阻元件物理接触，这种结构由于接点磨损和聚集灰尘或腐蚀造成变质(机器人的工厂环境)导致测量的输出电压偏离真实值。另外，由于接触不良引起的电噪声也造成明显的位置误差，这种误差对要求高精度位置的测量系统是不容许的。

线绕电位计按照图 2.1 所示线绕排列，只有当滑动接点从线圈的一环移动到毗连的一环时才会产生  $V_{out}$  变化。若电位计是用  $N$  匝电阻线构成，则能观察到的最小电压变化为  $V_s/N$ 。

百分分辨率可定义为

$$\% \text{ 分辨率} = 100 \frac{V_s/N}{V_s} = 100/N \quad (2.3)$$

例如，一个线绕电位计用于测量角度位置。采用 100 匝(即 100 环)电阻元件，游标可旋转  $300^\circ$ ，10VDC 电压加到电位计上，则最小电压变化

$$\Delta V = \frac{10}{100} = 0.1V/\text{匝}$$

故百分分辨率

$$\% \text{ 分辨率} = 100 \left\{ \frac{0.1}{10} \right\} = 1.0$$

若将上例中的电位计直接连接到电动机的轴，则其位置分辨率为  $3^\circ (300^\circ/100)$ 。这样的分辨率在机器人应用中不够好。因此，必须采用多匝电位计，或改进电动机驱动和耦合设计，使产生  $300^\circ$  以上的电动机旋转，以便产生同样的关节旋转。

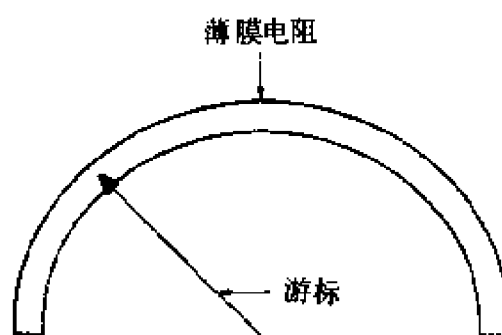


图 2.3 薄膜电阻电位计

为了既改进电位计的分辨率，又减小游标接触造成的噪声，设计了图 2.3 示出的用薄膜电阻制作的电位计。这种设计可大大减少最小角度变化，电阻膜与游标接触减少了噪声。

上述敏感元件的输出电压是单极性电压，图 2.4 示出的设计克服了这个问题。如图 2.4(b)所示，设计的这种电位计在游标移动范围内输出电压由  $-V_s$  到  $+V_s$ 。

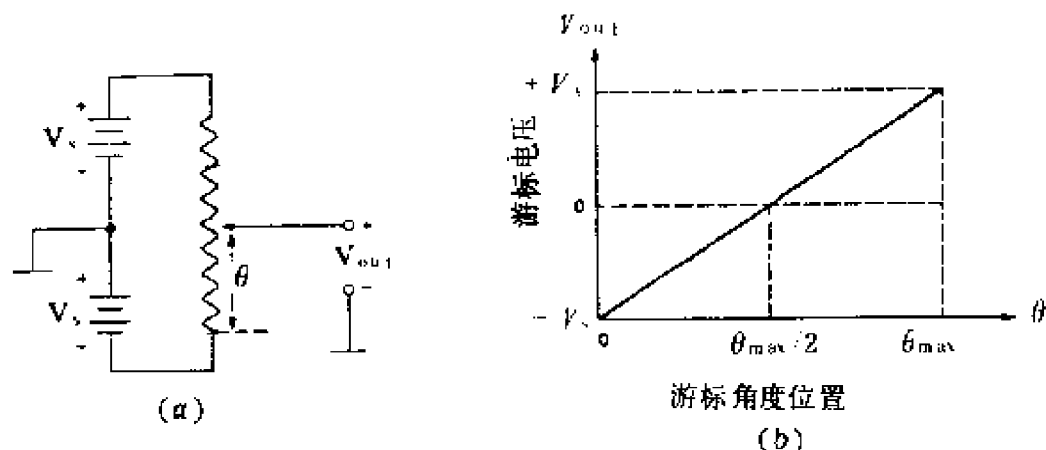


图 2.4 (a) 双极电压的电位计；(b) 在(a)电路中的理论转移特性

对于位置分辨率、精度要求不高，允许存在一定接触噪声的机器人反馈控制，电位计是可用的，图 2.5 示出一个实例。图中给出了为获得可讲授的端点或停止点的电路。特种关节的位置由



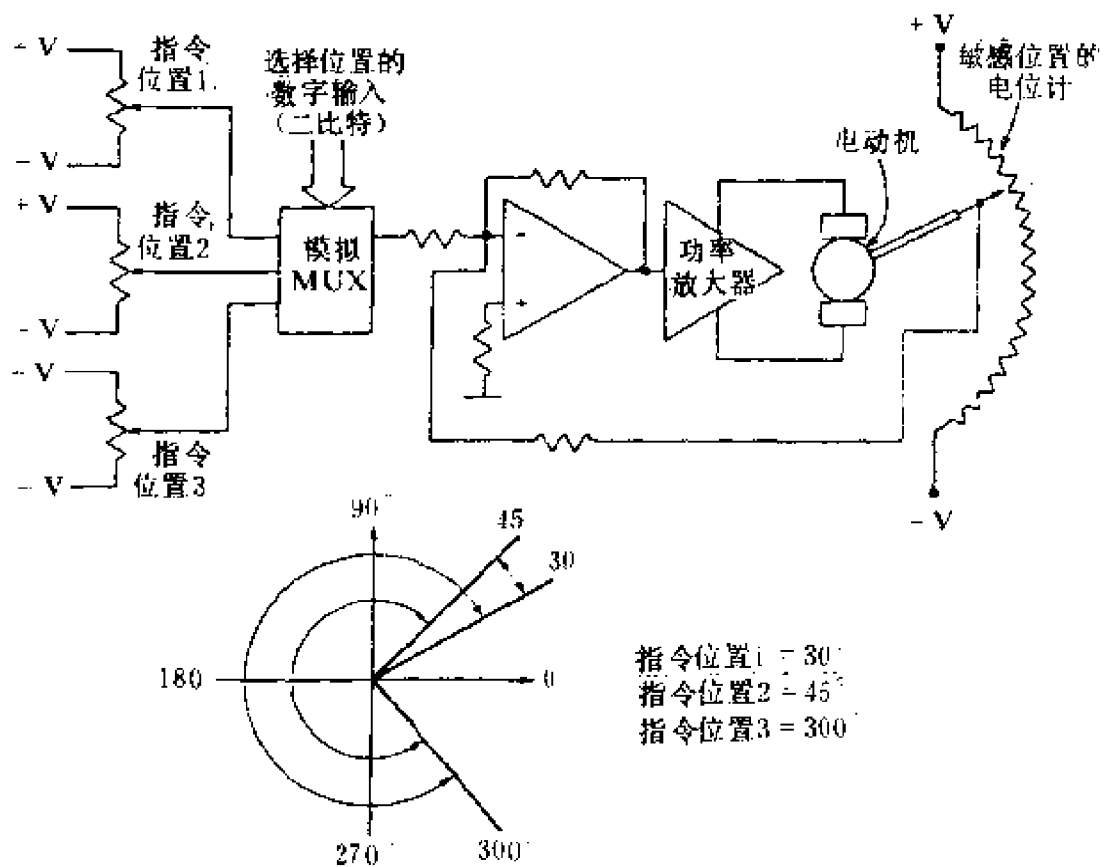


图 2.5 采用电位计的可讲授停止点电路

双极电位计监控并反馈到给功率放大器供电的运算放大器。需要的位置通过将输入电位计的输出电压调节到适当的值来确定。这样，输入位置跟电压成比例。反馈是负的，驱动机器人轴的电动机轴继续旋转，直到敏感位置的电位计的电压跟需要位置的电位计的电压相等为止。这时，机器人关节位于程序的终点。

模拟多路调制器(MUX)用于容许在数字信号控制下选择多个不同的输入。例如，图 2.5 中一个二位的数字码用来选择三个输入信号中的一个。若选择第四个输入，关节将被指令返回到基准位置。利用这种控制设计机器人的程序，可通过简单地调节输入电位计来完成。通过把一个二进制指令的程序输出到 MUX 便可获得包括多重点的移动。图中三个电位计的输出电压按照 MUX 的数字输出转动电动机轴 30、45 或 300°(全都相对于零

度)。利用这种结构,  $15^\circ$  (从  $30^\circ \sim 45^\circ$ ) 或  $270^\circ$  (从  $30^\circ \sim 300^\circ$ ) 的移动也可完成。

## 2.3 电容式电位计

电容式电位计如图 2.6 所示, A 和 B 间隙的电容  $C$  为

$$C_A = \frac{\epsilon S}{\delta_0 - x} \text{ 和 } C_B = \frac{\epsilon S}{\delta_0 + x} \quad (2.4)$$

式中  $\epsilon$  是介电常数,  $S$  是电容器极板的面积,  $\delta_0$  是极板间的初始间隙,  $x$  是测量的位移。因此, 未加扼流圈电路 ( $X_L = 0$ ) 的交流电阻

$$Z = \sqrt{\left(\frac{r}{2}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\omega C}\right)^2} \quad (2.5)$$

式中电容  $C$  由式 (2.4) 每个间隔计算,  $\omega$  是交流电流的频率。

电容式电位计的灵敏度很高, 约  $10^{-4}\text{mm}$ , 但其测量范围小。

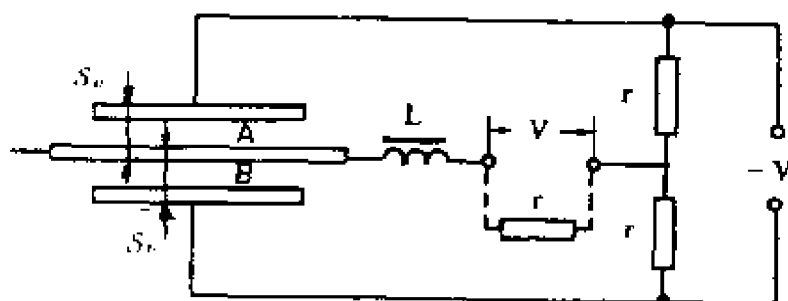


图 2.6 电容式电位计

## 2.4 自动同步机

使用电位计的最大实际问题是电位计为了产生输出往往需要物理接触, 但自动同步机可避免这一问题, 其一个旋转换能器即可把角位移变换成直流电压, 或把直流电压变换成角位移。早在二次世界大战期间这种器件就获得了广泛的应用, 但由于技术革新产生了其他许多位置敏感元件, 从而限制了自动同步机的应用。

然而，近年来随着固态技术的进展再次使自动同步机在机器人系统中重新获得应用。

自动同步机系统由控制发射机(CX)、控制变压器(CT)和控制差动发射器(CDX)构成，它们都是根据旋转变压器的原理工作。典型自动同步机是用二个或三个器件测量角度位置，或测量这种位置和指令位置之间的差别(例如位置误差)，如图 2.7 所示的二元件系统。由图可知，直流电压加到 CX 转子上，CT 的外氏(wye)结构定子和 CX 并联。根据变压器理论可知，变压器转子电压  $V_{out}(t)$  的大小取决于 CX 和 CT 转子之间的相对角  $\theta$ 。实际上，这种输出电压

$$V_{out}(t) = V_m \sin \theta \sin \omega_{ac} t \quad (2.6)$$

式中， $V_m$  和  $\omega_{ac}$  分别是基准(或“载频”)交流电压的振幅和角频率。式(2.6)代表调幅函数。无线电 AM 和自动同步机 AM 信号之间的差别在于后者是由于 CT 转子相对于 CX 转子的相对角  $\theta$  的载频调制，而前者是通过应用随时间变化的另一种电压信号而获得的调制

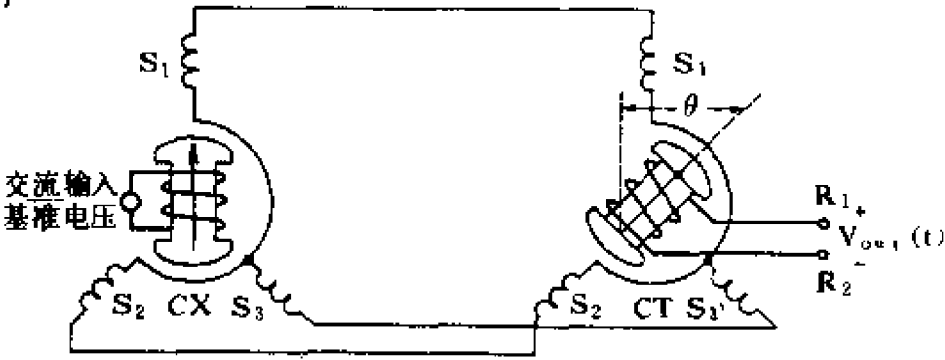


图 2.7 用于测量角位移的二元件(控制发射机 CX 和控制变压器 CT)自动同步机系统( $\theta$  是 CX 和 CT 转子间的相对角)

由式(2.6)和图 2.7 可见，当两个转子彼此互成直角时，输出电压有最大值；但当两个转子互相平行时输出电压为零。因此 CT 有时称作“零值指示器”。实际上，由于绕组中的非线性和电失衡，当两个转子排列成一直线时零值不精确为零，产生约 60mV

(输入 115VAC)“剩余电压”。由正弦函数的数学性质,若  $-70^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ , 则  $V_{out}(t)$  与  $\theta$  成近似的线性关系。因此,输出和角度位置之间成线性关系是重要的。自动同步机必须在  $\theta$  约  $0^\circ$  的工作点使用。

在理论上,CX 产生的 AC 信号跟 CT 产生的 AC 信号同相。实际上,两种器件结构上的物理差别必然产生不希望的相移。有时使用自动同步机控制差动发射机(CDX)调节两个自动同步机装置之间的相移。这样的器件还可用于产生需要应用的可变相移。图 2.8 中,主控和从动滚子之间的角度关系在处理过程中,通过转动 CDX 的轴可进行调节。

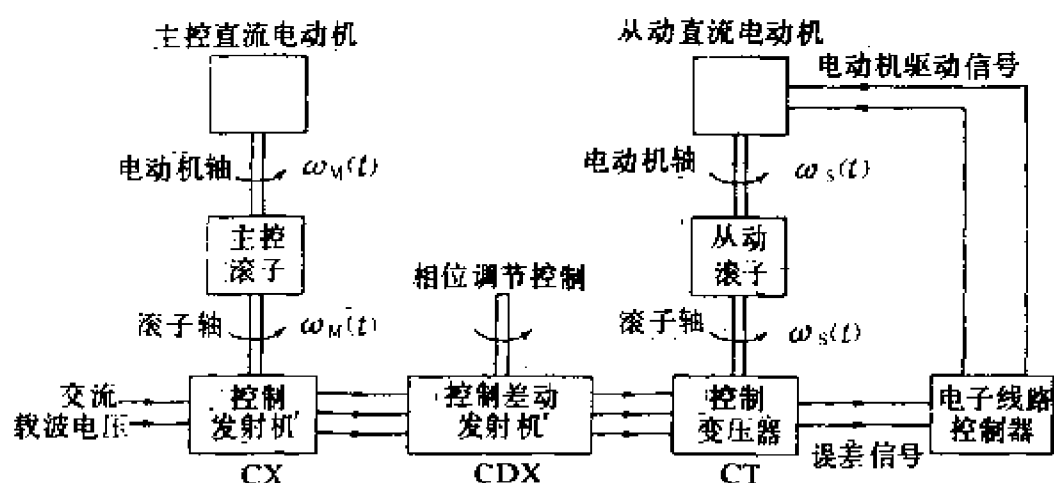


图 2.8 三元件自动同步机系统的伺服实例(为了保持产品(钢片等)一致性,从动滚子速度  $\omega_s(t)$  必须跟主控滚子速度  $\omega_m(t)$  同步。用 CDX 产生主控和从动之间需要的角度关系。CT 的输出信号是需要的和实际的主控和角之间的差(误差),该信号用于提供从动电动机的驱动信号)

在经典的位置伺服应用中使用如图 2.9 的二元件自动同步机,可观察到指令或输入(即角度  $\theta_1$ )从 CX 产生一个指令电压。CT 根据式(2.6)产生一个误差电压,式中  $\theta = \theta_1 - \theta_2$ 。该误差信号经放大后能使伺服电动机旋转到  $\theta$  再次为零。这种应用中,二元件自动同步机提供一个严格、可靠和低成本的监控位置误差的方

法 但是,将指令位置变换成 CX 的物理角度旋转,这种系统在实际应用中跟数字器件接口不切合实际。因此,随着微处理机控制系统的出现,自动同步机跟与数字系统更为兼容的其他敏感位置的方法相比,将不再采用自动同步机。

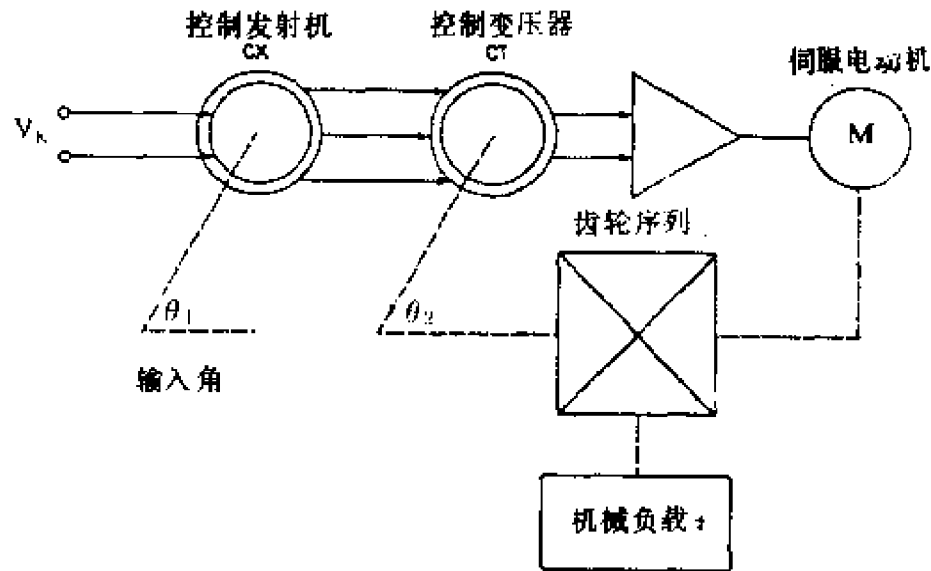


图 2.9 用于位置伺服环路的自动同步机(要求的角度位置是  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  是电动机轴的实际角度位置,  $V_k$  是交流基准(载频)电压)

但是,利用数字和混合技术已研制成能跟数字系统接口的自动同步机系统,如图 2.10 示出取代图 2.9 位置伺服的 CT 数字-同步(D/S)变换器。从计算机(如主控器)发出的数字位置指令信号通过 D/S 变换器变换成三相交流电压,该电压跟  $\theta_1$  的物理接触导致 CX 产生的电压相对应。CT 再一次充当位置误差传感器,系统功能跟图 2.9 所示系统的作用相同。D/S 变换器产生部分是数字和部分是模拟的位置伺服。

## 2.5 解 析 器

解析器实际上是自动同步机中的一种,因此常称作“自动同步机解析器”。这两种器件的主要差别是解析器的定子和转子绕组

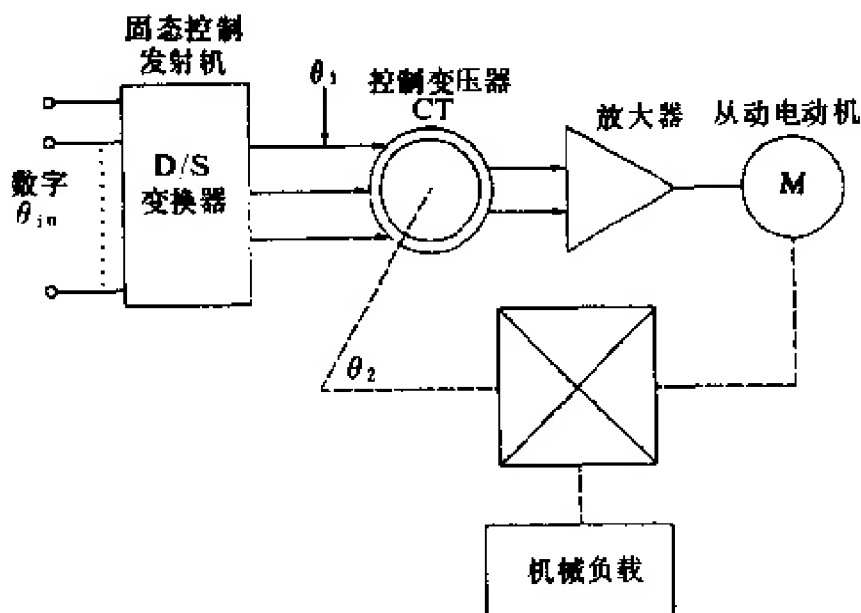


图 2.10 如图 2.9 所示位置伺服的自动同步机制发射机 CX 代替 D/S 变换器。这种设计能使需要的输入  $\theta_m$  数字化,即系统与微处理机兼容。

彼此机械地移动  $90^\circ$ , 而自动同步机的相移是  $120^\circ$ 。解析器的最通用形式具有单个转子和两个定子绕组, 如图 2.11 所示。采用交

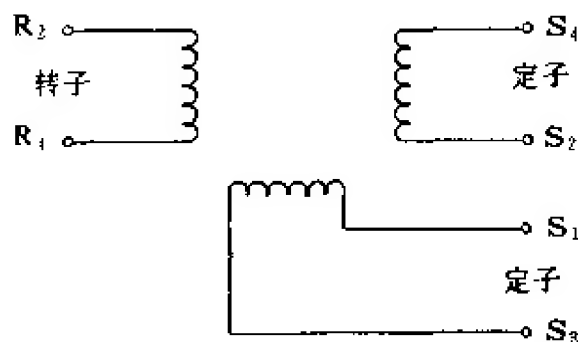


图 2.11 解析器的电路 (一个交流载频电压输入到转子, 两个定子绕组输出电压的幅度取决于解析器轴的角  $\theta$  的正弦或余弦)

流载频电压  $V_m \sin \omega_c t$  激励转子, 两个定子电压分别为

$$V_{1-3}(t) = V_m \sin \theta \sin \omega_c t \quad (2.7a)$$

$$V_{2-4}(t) = V_m \cos \theta \sin \omega_c t \quad (2.7b)$$

解析器有两个定子和两个转子绕组，在实际使用中载频电压可加到这些绕组中的任何一个。若前一个定子用作输入，则不用的定子绕组应短路。输出电压的量值由式(2.7a)和(2.7b)给出，并可从转子绕组两端检测。若一个转子绕组用作输入，则两个定子绕组用作输出。

如同自动同步机一样，已有一系列特殊应用的片式解析器问世，它能除去解析器伺服系统中一个元件。如图 2.13 所示的模拟器件固态解析器控制变压器(RSCT1621)可用 RT 代替。如图所

示,一个代表  $\phi$  的 14 位数字控制指令和表示实际角度  $\theta$  的 RX 模拟输出都输入到 D/R 变换器。因此,这种器件的输出是跟  $\theta - \phi$  成比例的模拟电压。这种片式器件是一个混合器件,它不仅含有需要处理两个输入角的数字和模拟电路,而且还有适当的输入和输出变压器。D/R 和 D/S 变换器之间的主要差别仅是在变压器的构形上。

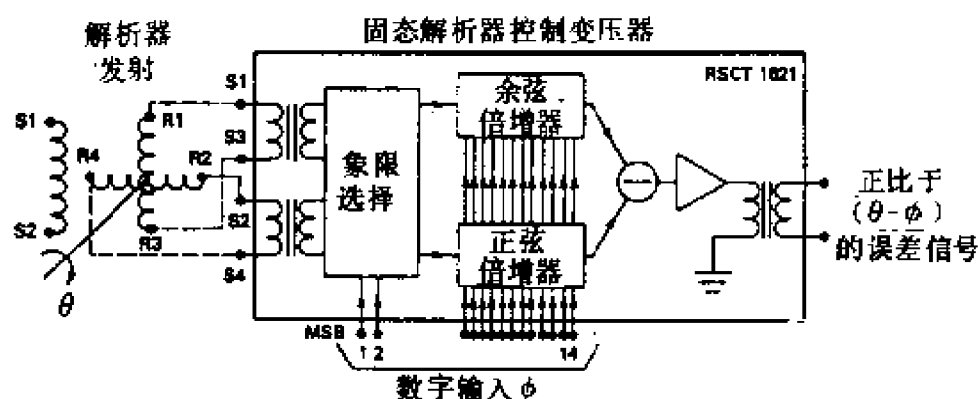


图 2.13 解析器发射机和 RSCT1621 固态解析器控制变压器的工作原理图(采用这种混合器件能除去变压器的分离输入和输出。 $\theta$  是测量的角度位置, $\phi$  是需要的角度位置)

图 2.14 示出用片式元件的位置伺服系统。D/R 变换器(或 DRC)的输出是交流电压,故通过交流放大器、相位检测器和积分器获得进入伺服放大器的驱动信号。如同可比较的自动同步机系统一样,这种伺服在功能上是混合的,因为指令信号是数字的,而监控位置(误差)在性质上是模拟的。

机器人的控制系统必须有致动器轴(或关节)的实际角度位置的数字表示,图 2.15 示出完成这种功能的跟踪 RDC。图中 RX 直接或通过齿轮组连接到被监控的轴,变换器“跟踪”数字输出的轴的角度。因此,可看到 RDC 代替 RT 和 ADC,但跟 ADC 不同,从 RX 来的输入电压通过由 RDC 的分辨率确定的阈值改变时,则自动完成跟踪 RDC 的变换。例如,若使用一个 12 比特的变换器,解



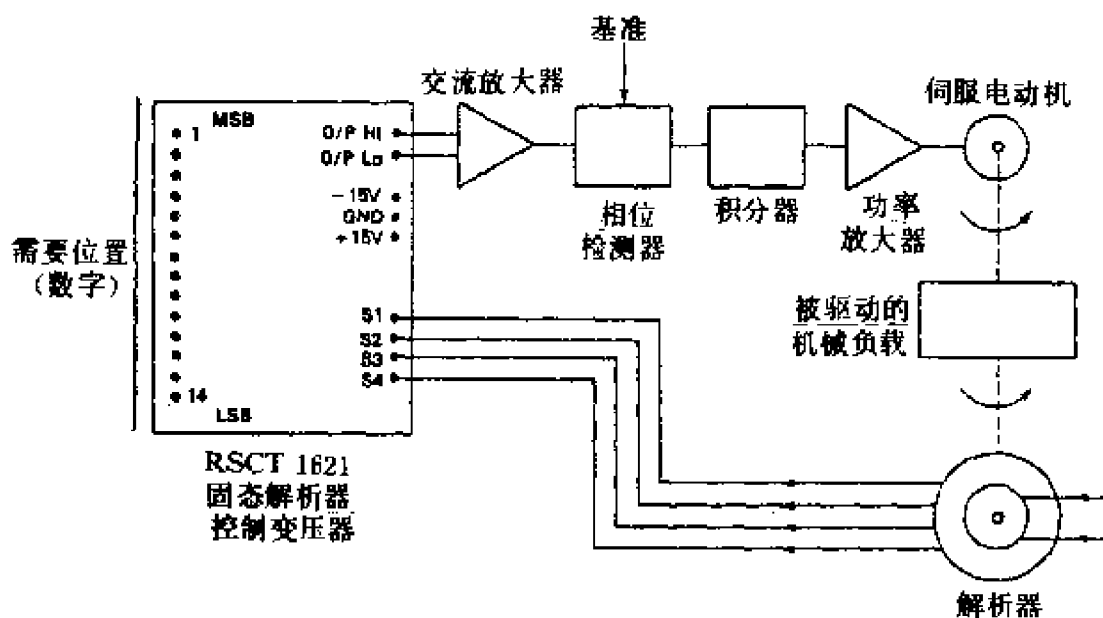


图 2.14 位置伺服用 D/R 变换器(RSCT1621)(D/R 输出是交流电压, 故采用交流放大器)

析器轴开始变换时, 最小角度变化为  $0.088^\circ (360^\circ/2^{12})$ 。跟许多 A/D 变换器不同, 它不需要外部触发 R/D。

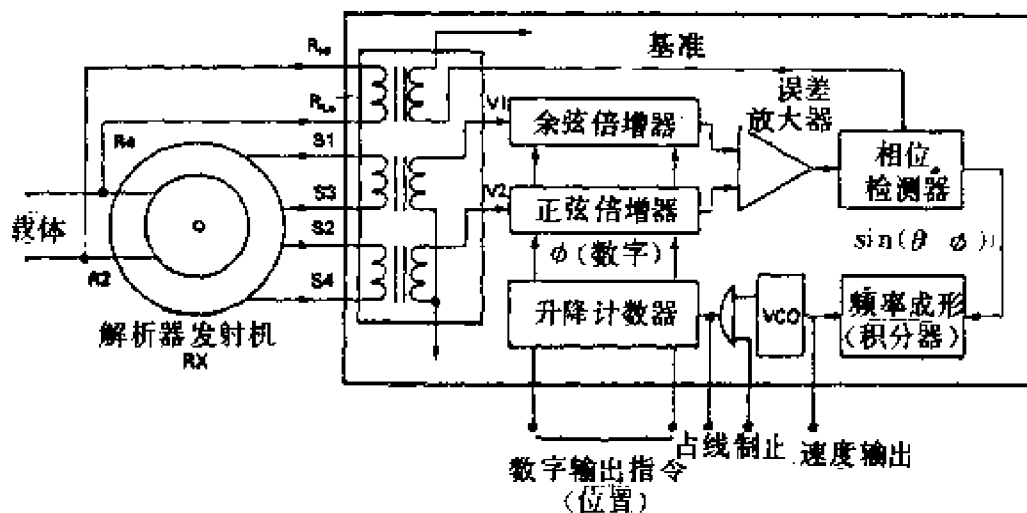


图 2.15 跟踪解析器-数字变换器(RX 敏感实际位置  $\theta$ , 片式变压器输出这种角度的数字形式, 速率  $d\theta/dt$  是一个模拟量)

现在也可用跟踪自动同步机-数字(S/D)变换器。这种器件和

上述 RDC 的区别是片式输入变压器的构形不一样，它必须是三相而不是二相电压。

R/D (或 S/D) 变换器比 D/R (D/S) 器件优越。由图 2.15 可知，R/D 变换器有速度输出。跟踪 R/D (或 S/D) 有许多类型可用。终端模拟电压表示输入角  $\theta$  (或角速度) 的时间变化速率。若 RX 连接机器人关节驱动器的轴，则 R/D 给出角度位置和速度信息。为了提供需要的阻尼量，机器人关节中使用的位置伺服需要速度信息，有速度输出的 R/D (或 S/D) 变换器能给出这种信息。在低速特性和线性度方面，R/D 的速度信号比其他速度传感器的更好，可得到比数字位置传感器 (如增量型编码器) 的速度信号更好的整个速度信号。

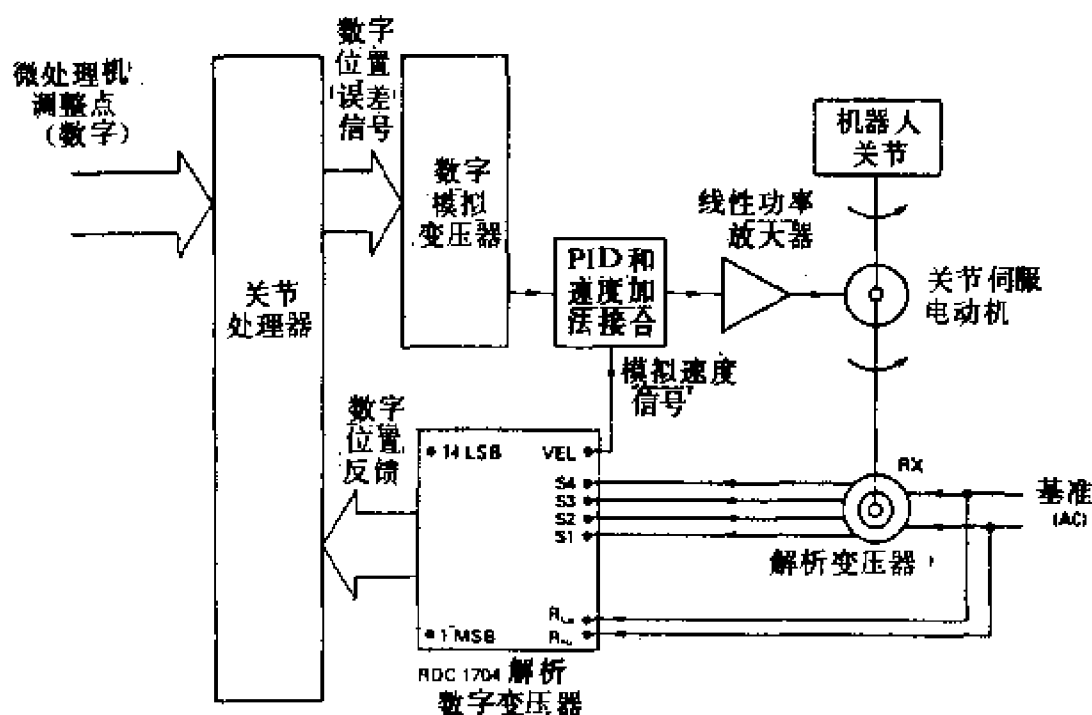


图 2.16 用于机器人单个关节位置伺服中有速度输出的跟踪 R/D 变换器 (因为位置信息是数字的，而速度信息是模拟的，故这种器件是混合伺服)

这种器件在位置伺服中用于控制机器人的一个轴，如图 2.16 所示。这种系统对应于前述混合伺服、角度位置指令和误差信号是

数字的,输入速度环路(即指令和实际速度信号)的是模拟电压。

用于监控角度位置和速度的 R/D、S/D、D/R、D/S 片式器件的出现,使解析器和自动同步机有可能在机器人系统中应用。但是,这些器件在现代机器人中没有获得普遍应用。原因,一是成本高,变换器单片和 RX(或 CX)组合通常比具有同样分辨率的光学编码器(包含有关的电子线路)的费用高得多;二是载频信号造成的电磁干扰(EMI)潜在问题,若对机器人控制器进行子系统屏蔽,又会增加成本;三是和用其他位置监控技术相比,需要耗费更多的导线,这对移动机器人关节特别困难。不过,若能降低解析器/自动同步机系统的总成本,这种器件在机器人伺服系统中还是有用的。

## 2.6 Motornetics 解析器

Megatorque 电动机驱动机器人能产生需要的最大转矩,但该电动机需要跟高分辨率的位置传感器一起使用。这种传感器已由 Motornetics 公司研制成功。图 2.17 示出 Motornetics 解析器的截面图。这种以磁阻为基础的解析器的几何形状为圆环形,它由单

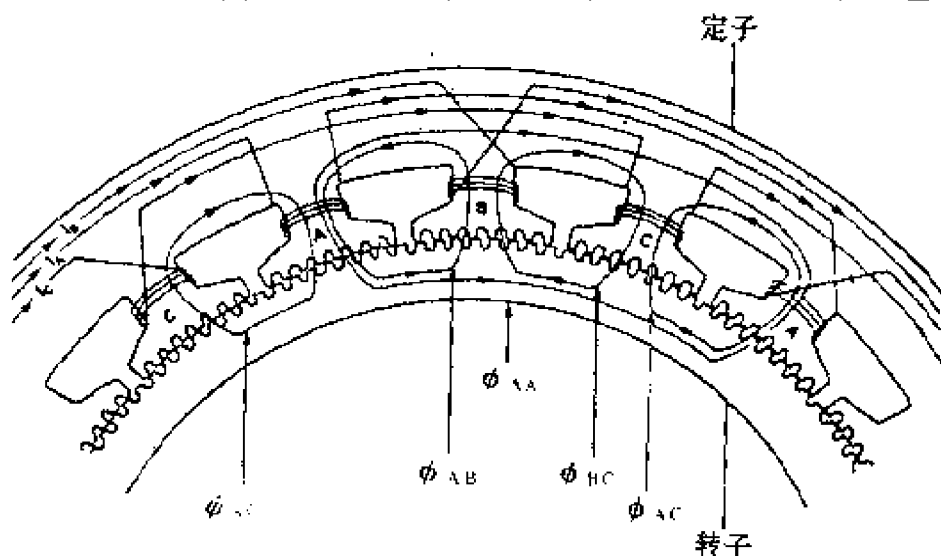


图 2.17 Motornetics 解析器(电流和磁通路径简图)

个多极有齿和绕组的定子跟有齿无绕组的转子构成。实际上，初级和次级绕组组合在一起，以便利用全部有效磁面积，从而改进传感器的精度，并提高信号电平。这种器件只需四根导线，这在机器人应用中十分有利。

虽然 Motornetics 解析器的定子和转子有同样数量的齿，但齿的排列每第三个极需要改变。这种改变是通过变更每个极的齿相对于它两边相邻的齿变化  $1/3$  齿距来实现。电气上，每第三个绕组串联，以便自感和互感（相对于其他两相）成周期变化。这种结构可由图 2.17 看出。周期重复一次转子移动一个完全的齿距。按照这种方法，机械角等于电气角除以转子的齿数  $N$ 。这种解析器的设计通过铁磁齿倍增传感器的极数而不需要大量的绕组，从而使制作成本减至最小，并避免了由于线圈破裂造成的故障。例如，若  $N=150$ ，可认为器件具有象位于 150:1 减速器输入侧的标准解析器的特性，每一次机械转动，电信号通过 150 个周期。

Motornetics 解析器有类似于自动同步机的三相性质，并通过电子线路修正信号，以便 RDC 将模拟位置信息数字化。一个 10 比特 RDC 的电动机转动一转产生满量程分辨率达 153,600 ( $150 \times 1024$ ) 计数。与此对应的 12 比特 RDC 的满量程分辨率为 614,400 计数。这样的分辨率远大于 80 年代中期工业机器人的分辨率 (40000—60000 计数/转)。

多重循环解析器跟上述单循环解析器不同，它是一种增量型位置敏感器件而不是绝对型敏感器件。使用这种传感器的机器人，因为实际位置只在一个循环内确定，故不知道真实位置，循环  $N$  内不知道哪个循环是敏感的。机器人的校准程序可克服这种困难，例如，驱动全部关节（未考虑位置传感器的输出）一直到它们碰到机械末端才停止。然后，电动机反转使机器人关节从这些末端停止后退到一个指定的计数，从而全部数字位置计数器为零。为了获得绝对位置信息，只需要硬件保持计数和循环数跟踪，这是容易做到的。

## 2.7 感应式传感器

感应式传感器是广泛用于数控机床的器件，它是公认的精确测量位置的装置。其测量精度线性度为  $2.54 \times 10^{-3} \text{mm}$  (旋转精度为  $0.00042^\circ$ )。

在实际操作中感应式传感器跟解析器非常类似。不论其构形是线性式的还是旋转式的，通常都有两个磁耦合部件，其中一个相对于另一个移动。图 2.18 示出线性感应式传感器，其中固定元件称为刻度盘，可动元件称为游标。两种元件都用印刷电路技术制作，

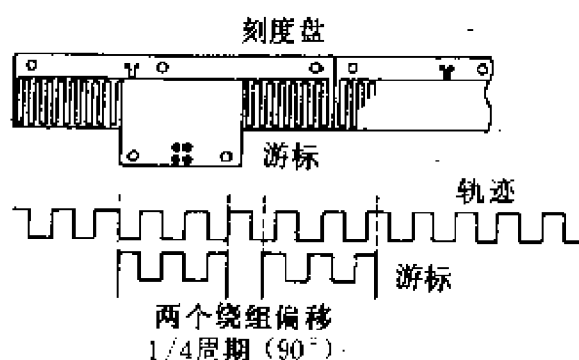


图 2.18 线性感应式传感器

用这种技术可提高精度。有 0.1、0.2 和 2mm 周期节距的矩形波铜轨粘在基片上。刻度盘有长达几英寸的连续轨迹 (10、20 英寸或更长)。游标长约 100mm，由刻度盘那样节距的两个分离轨构成，但相互之间隔离  $1/4$  周期 ( $90^\circ$ )。游标能在刻度盘全部长度上机械地移动。两个元件之间的间隙约 0.127mm (两元件之间装有静电屏蔽以防止因外部施加力造成意外的短路事故)。

跟解析器的情况一样，刻度盘加上交流电压  $V_m \sin \omega_{ac} t$ ，载频 ( $\omega_{ac}/2\pi$ ) 为 5~10kHz。两个游标轨迹的输出为

$$V_{S1} = V_m \sin \left( \frac{2\pi x}{S} \right) \sin \omega_{ac} t \quad (2.8a)$$

$$V_{S2} = V_m \cos \left( \frac{2\pi x}{S} \right) \sin \omega_{ac} t \quad (2.8b)$$

式中  $x$  是沿刻度盘的线距离，而  $S$  是波节距。正弦变化的输入电压以跟解析器极相似的方式进行空间调制 (参见式 (2.8a) 和

(2.8b))。跟解析器不同的是,空间变化是在刻度盘轨迹的每个循环重复。因为式(2.8a)和(2.8b)表示刻度盘的许多极(即循环)两端的平均电压,节距和导体间隔的变化都被减小,故这种器件有助于获得高精度。

旋转感应式传感器的定子对应于线性感应式传感器的游标,两个分离矩形轨迹波形径向地位于圆盘上。此外,分离的正弦和余弦轨迹物理地交替排列,故允许由于达到平均间隔变化造成的误差。因此,旋转感应式传感器可能是现代监控工业机床位置最精确的装置。如前述,其典型精度约 $\pm 0.00042^\circ$ ,但高成本使其应用受到限制。

旋转感应式传感器的转子对应于线性器件的刻度盘,转子中有单个、连续和几乎全是矩形印制轨迹。典型器件在圆盘上到处都有 $128\sim 1024$ 个循环(或 $256\sim 2048$ 个极)。因为是旋转结构,故采用电刷或滑动环给转子加上交流输入电压(也可采用无电刷结构)。器件输出电压在定子的两端予以监控,除了 $2\pi x/S$ 用 $N\theta/2$ 取代外,有跟式(2.8a)和(2.8b)所示的相同形式。式中 $N$ 是转子的极数, $\theta$ 是转子相对于定子的旋转角。

在实际操作中,感应式传感器的任何一种形式都能象解析器一样使用。例如,在简单位置伺服中一个感应式传感器能起到发射机(RX)的作用,而另一个跟接收机一样。解析器可用作RX,而感应式传感器则可用作RC,后一种方法的优点是,由于位置指令信号使解析器旋转一周,感应式传感器只产生一个单一的周期运动。因此,取决于后一种器件的分辨率(即在 $360^\circ$ 范围内每单位长度的循环数),使用感应式传感器能在高精度范围内给机床定位。

上述结构对于机器人的棱柱形关节或旋转关节有潜在吸引力,但是,齿轮或调和驱动仍需要,以便从致动器获得倍增转矩的输出。因此,感应式传感器增加的成本,以及将输出信号数字化的电子线路的成本,导致感应式传感器比其他位置监控传感器

较少引人注目。但是，今后若要求更高精度，这种器件总有一天会在机器人设计中获得应用。

## 2.8 线性可变差接变压器

线性可变差接变压器(LVDT)是一类极为严密和能检测精确位置的器件。由图 2.19 可见，LVDT 由可动和固定两部分构成。机电换能器产生的电压输出跟可动部件的位移量成比例，±6.3mm 到几英寸满刻度的灵敏度为 1mv/0.02mm。LVDT 是模拟器件，其分辨率受外部监控器件(电压表)限制。

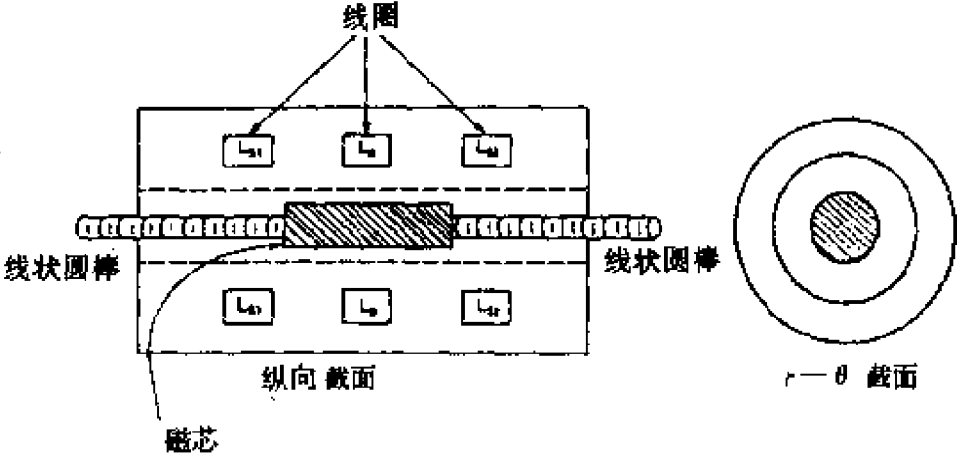


图 2.19 显示单个初级和两组次级线圈的线性可变差接变压器(LVDT)(磁芯是传感器的可动元件)

LVDT 是在圆柱形线圈构形上设置三个相等间隙的线圈( $L_p$ 、 $L_{s1}$ 和  $L_{s2}$ )，如图 2.19 所示。圆棒状磁芯位于线圈组件内部的轴上，并能自由地前后滑动。这种可动元件起到连接三个线圈磁通量的磁路作用。

LVDT 的等效电路如图 2.20 所示。由图可见，在线圈初级侧  $L_p$  上加交流电压(对应于图 2.19 的中心线圈)。次级侧的  $L_{s1}$  和  $L_{s2}$  反相串联连接(注意绕组上小点的位置)，若初级和每个次级绕组之间的耦合相等(即这些线圈感应的电压相等)，则  $V_{out}$  为零。

若磁芯离开中心位置，则  $L_{s1}$  和  $L_p$  之间的耦合不同于  $L_{s2}$  和

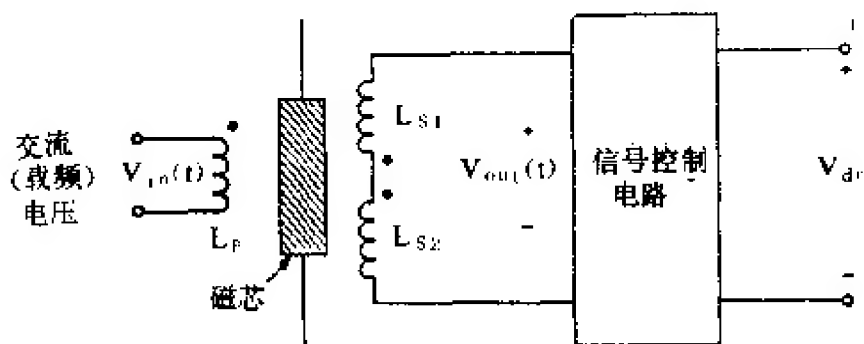


图 2.20 表示磁芯的 LVDT 的电路(次级线圈成反相串联连接, 故当磁芯位于 LVDT 的中心时,  $V_{out}(t)$  为零。信号调节器用于调制  $V_{out}(t)$ , 并产生跟磁芯离零点(中心)的距离成比例的直流电压)

$L_p$  之间的耦合, 前者增加则后者减少。因此,  $V_{out}(t)$  的大小与磁芯的线位移密切相关, 采用适当的设计能使这种输出电压跟位移成线性关系, 如图 2.21 所示。正常操作时, 物体的位置跟圆棒磁芯接触, 故电压跟物体位移成比例。

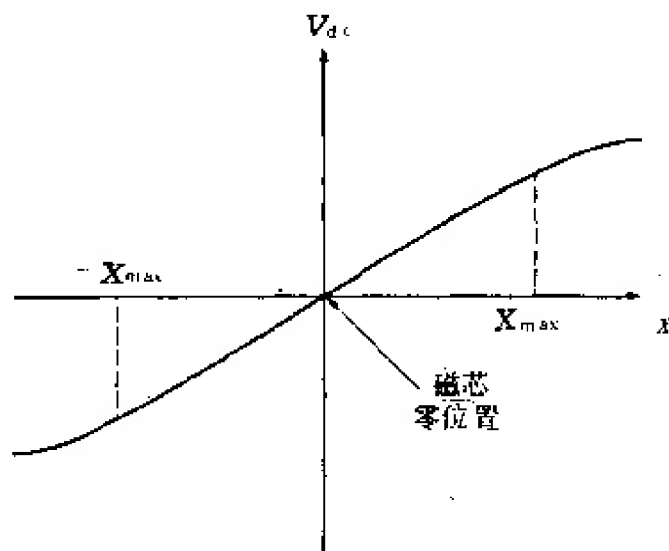


图 2.21 LVDT 信号调节器的输出与磁芯位置的关系(对  $|x| \leq X_{max}$  特性的线性度好, 该范围之外则线性度变差)

图 2.20 所示的信号调节器能完成许多功能。一是把交流电压  $V_{out}(t)$  变换成直流电压  $V_{dc}$ , 如图 2.21 所示。二是确定相对于



$V_{in}(t)$  的  $V_{out}(t)$  的相位。

信号调节器完成解调。施加到  $L_p$  上的电压可认为是载频信号。磁芯动态移动时,载频被运动波形  $f(t)$  调制。为了敏感动态特性,信号调节器必须除去高频交流成分,也就是必须解调  $V_{ind}(t)$  以便产生跟物理运动波形  $f(t)$  成比例的电压  $V_{dr}$ 。

LVDT 用于敏感纯线性运动的位置(如车床等)。旋转运动用 RVDT(这里 R 代表“旋转”)敏感。RVDT 是工作原理跟 LVDT 相同的器件,但其有旋转机。应指出的是,这两种器件用于机器人均存在许多问题。

机器人应用 LVDT 的首要困难是需要围绕其中心点工作。其次是 LVDT 的零位随时间和温度漂移。LVDT 和 RVDT 作为位置传感器的主要困难是大多数机器人的关节运动不完全是直线或圆运动,而是复杂的组合运动。为了形成 LVDT/RVDT,磁芯必须经常跟线圈的轴保持在同一直线上,否则会产生弯曲或导致装置损伤。另外,RVDT 只能敏感约  $\pm 60^\circ$  的旋转运动,而许多机器人轴要求大于  $120^\circ$  的移动。

即使上述困难得到克服,因为 LVDT 是模拟器件,它不宜用于微处理机控制伺服系统。另外,传感器、信号调节电路和 A/D 变换器的成本也高于等效的光学增量型编码器及其电路的成本。因此,LVDT 虽然有好的分辨能力,它也不会作为一种内部位置传感器过早地用于机器人本身。但是,这种器件用于跟机器人相连的装置是可行的,并已实用。

## 2.9 气压传感器

气压传感器的基本模式如图 2.22 所示。其主要元件是喷管 I 和 II。空气在喷管中连续流动的表达式如下:

$$\alpha_1 f_1 \rho V_1 = \alpha_2 f_2 \rho V_2 \quad (2.9)$$

式中  $\alpha_1, \alpha_2$  分别是喷管 I 和 II 的流速系数;  $f_1, f_2$  分别是喷管 I 和

Ⅱ 的截面积； $\rho$  是气体密度（假设是常数）； $V_1$ 、 $V_2$  分别是喷管Ⅰ和Ⅱ的气流速度； $H$  是喷管Ⅰ前面的工作压力； $h$  是喷管Ⅱ前面的工作压力。若喷管Ⅰ和Ⅱ中的实际气体密度相等，且

$$\alpha_1/\alpha_2 = 1 \quad (2.10)$$

则喷管Ⅰ和Ⅱ中的气体速度如下：

$$V_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho}(H - h)}; V_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho}h} \quad (2.11)$$

将式(2.11)代入式(2.9)，可得

$$\alpha_1 f_1 \sqrt{(H - h)} = \alpha_2 f_2 \sqrt{h} \quad (2.12)$$

由式(2.12)和  $\alpha_1 = \alpha_2$  可得

$$h = \frac{H}{1 + (f_2/f_1)^2} \quad (2.13)$$

显而易见，面积

$$f_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (2.14)$$

设图 2.22(b)所示面积  $f_2$  可用简单方法计算， $s$  代表元件表面和喷管正面之间的距离，则

$$\frac{\pi d_2^2}{4} \geq \pi d_2 s \quad (2.15)$$

或

$$s \leq \frac{d_2}{4}$$

对于圆筒截面的面积，计算  $f_2$  的公式如下：

$$f_2 = \pi d_2 s \quad (2.16)$$

将式(2.16)和(2.14)代入(2.13)，则

$$h = \frac{H}{1 + 16(d_2 s)^2/d_1^4} \quad (2.17)$$

上式给出压力  $h$  与距离  $s$  的关系。这类传感器在检测时无需直接机械接触，且灵敏度优于 0.001mm。因此，它可用于旋转时检测尺寸，从而节省了时间和费用。

图 2.23 示出自动连续测量金属带厚度的简图。图中从压缩机

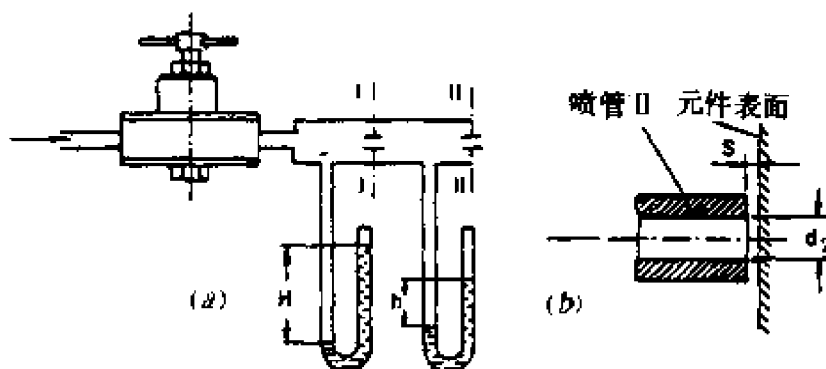


图 2.22 气压传感器示意图

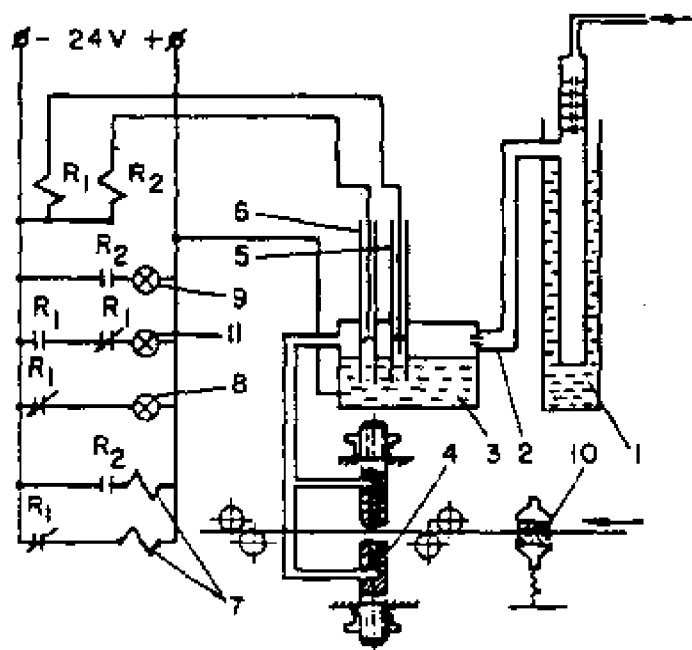


图 2.23 自动连续测量金属带厚度的装置图

来的空气经压力稳定器 1、电接触转换器 3 的进口喷嘴 2, 然后到达气压计 4。转换器用水银充填, 其有管子 5 和 6, 管子的下端浸入水银中。两个管子在不同的液面含有接点。当管子 5 中的水银面达到其接点时, 继电器  $R_1$  的线圈通电, 从而激励该继电器接通。接点由开启变成闭合, 而闭合变为开启。于是, 灯泡 11 变亮。压力进一步增加, 当管子 6 中的水银面达到接点时, 管子 5 中的接点还是闭合, 继电器  $R_2$  的线圈通电和灯泡 9 变亮。接点不闭合时, 灯泡 8 接通。除信号灯外, 该线路图激励控制器件校正金属带厚度的继电器 7。为了使测量可靠, 设置清洁器件 10。

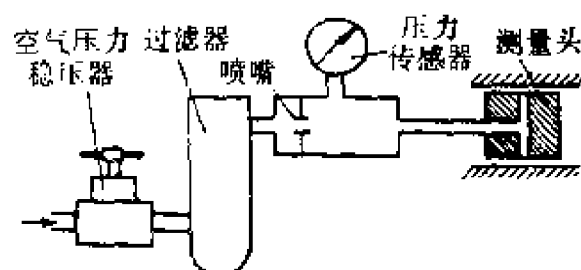


图 2.24 控制圆孔直径的气压装置

图 2.24 示出控制圆孔尺寸的装置示意图。这种装置测量时不需要跟待测物体机械接触。另外，在两种情况下，测量两个空隙的和。这样，不需高精度调整装置。该装置测量喷嘴间的初始距离和受金属带厚度(或圆孔直径)影响的距离之间的差。

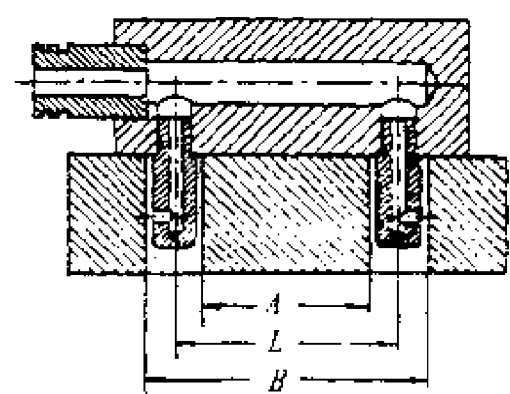


图 2.25 控制中心距离的气压装置

这种方法适用于控制两个空隙之间的中心距离。图 2.25 示出估算尺寸 B 的测量头。反转传感器方向便可测量 A 值。显然，中心距离

$$L = (A + B) / 2 \quad (2.18)$$

图 2.26 示出的装置能直接测量 L。测量头 6、7、8 和 9 安装在跟 A 和 B 值一致的圆棒 5 上。这些测量头连接到压力传感器 3（这里传感器用流体气压计代替，由气压计刻度盘 4 可读出结

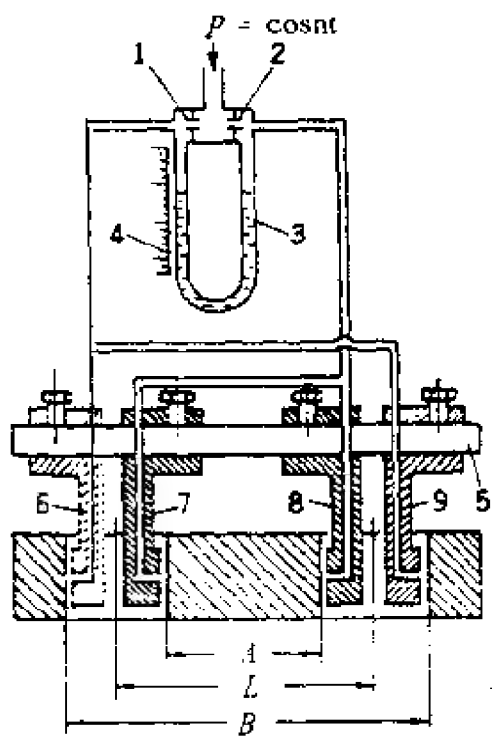


图 2.26 允许开端直径偏离的控制中心距离

果)。圆孔直径的偏离不影响测量结果，因为这种偏离激励传感器两侧。为了结果精确，喷嘴 1 和 2 必须严格一致。

图 2.27 示出检验圆锥形状的装置(这种装置要求跟待测物体局部接触)。图中 1 是测量的圆锥形状，2 是测量喷嘴，3 是机械支架。工作程序可从图中看出。这一原理同样适用于测量固体材料中圆锥形孔，图 2.28 示出这种装置。在这种装置中，进行测量是为了从要求的圆锥形形状中获得平均偏转。喷嘴 3 和 4 连接到压力连接器 1，喷嘴 5 和 6 连接到连接器 2

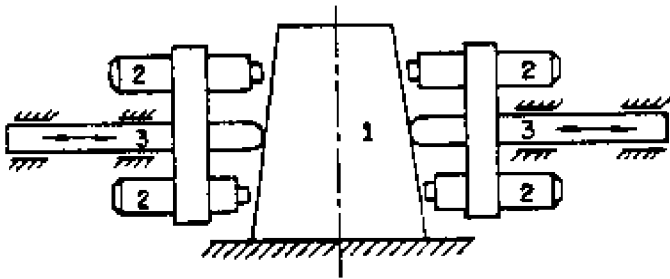


图 2.27 气压控制圆锥表面

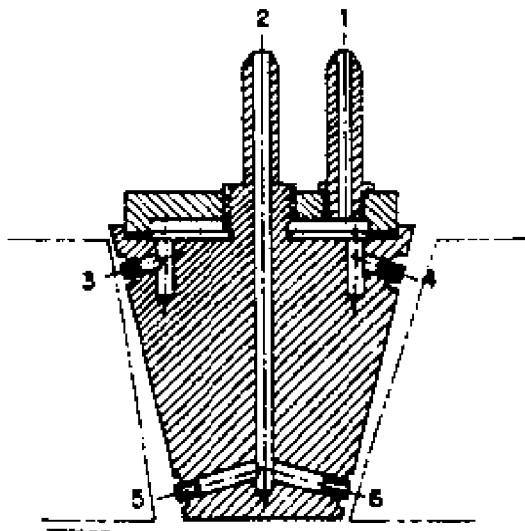


图 2.28 气压控制圆锥形开端

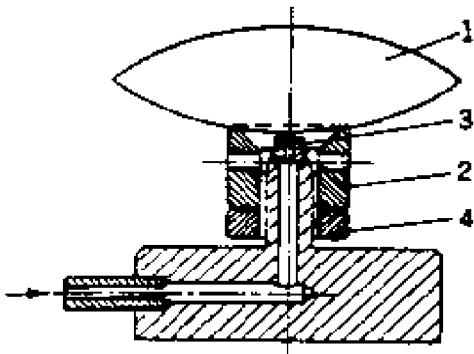


图 2.29 球体的空气压控制

图 2.29 示出的另一个实例是监控球形表面(如光学透镜)空气压装置。待检验的透镜 1 安装在支承环 2 上。透镜和测量喷嘴 3 之间的间隙取决于透镜的曲率。几种位置的曲率可通过移动透镜检验。这种装置通过调节支

架 2 和用螺母 4 固紧来调准各种透镜。这种装置还适用于凸状和凹状物体。

图 2.30 示出机械驱动气压传感器的实例。卡规 1 由导向装置定向进入外壳 2 内。卡规有一个圆锥状的测量头 3。测量头 3 和衬套 4 形成阀门。管接头 5 提供通过装置的气流(出口为开端 6),并跟压力传感器连接。

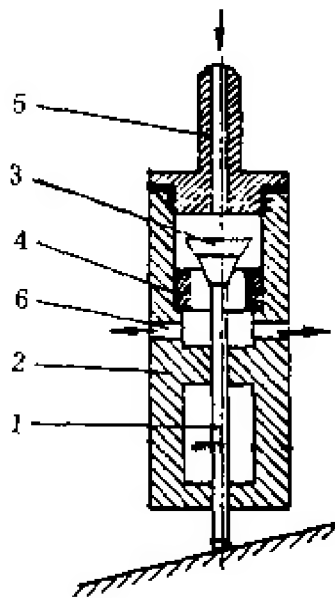


图 2.30 跟踪(或测量)用气压机械卡规

## 2.10 机械传感器

测量线、条带、带状等连续材料时,一种有效方法是将滚筒跟连续材料接合。通过计数滚筒的转数(已知圆周长度),便可估算出消耗材料的长度。这类装置在纺织品生产中通用。

# 第三章 机器人关节部位敏感 线位移和角位移的光 学动觉传感器

利用光学传感器检测位置，不仅容易完成，还可获得高精度。下面讨论这种传感器及其在机器人领域的应用<sup>[3]</sup>。

## 3.1 光学断续器

逐点型机器人只需要精确检测起始和终端点，实际路径并不重要。致动器驱动机器人的关节到能敏感的最终位置，这时致动信号被除去。实际上，利用开路控制系统，移动端点传感器到不同位置便可完成编程。

机械开关(或微开关)是适合上述应用的理想器件。但是，开关和微处理机之间需要接口，从而导致接触回跳和缩短寿命，故这种方法在工业机器人中应用是不切实际的(可用于教育型机器人)。

光学断续器可避免上述问题，图3.1示出光学断续器的原理图。至少有一个暗区的透光盘设置在光发射器(LED)和光接收器(光敏晶体管)

之间。光到达接收器，直到圆盘旋转导致“黑色标志”阻塞光为止。这种器件能产生二元的(或开-关)信号，用于敏感移动端点。例如，

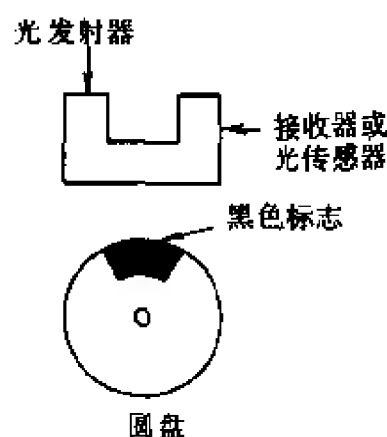


图 3.1 简单光断续器

光敏晶体管只要光照射晶体管的基极，输出就会下降。另一方面，当某电极无光时其电压很高。

图 3.2 示出简单电子线路的方块图，该电路使这种传感器驱动机器人轴到达移动端点。图中示出的系统由瞬时闭合的起动开关激励。电动机连续旋转，直到圆盘上的黑色标志阻止光达到光传感器为止。发生这种情况时，电动机电压关闭，轴逐步停止（若需要，可添加辅助电路，以便产生动态制动，因而能很快停止电动机转动）。

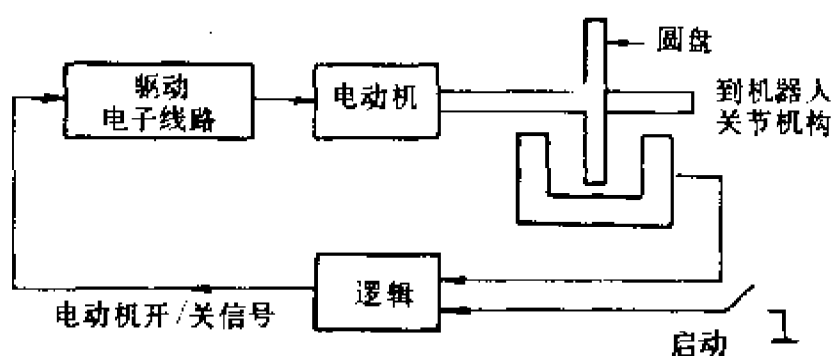


图 3.2 定向电动机控制电路方块图（开关闭合时电动机开始旋转）

图 3.3 示出一种逻辑传感器电子线路原理图。数字信号  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  的波形如图 3.4 所示。为了了解这种电路的工作，回忆只有当两个输入（这个实例中  $S_1$  和  $S_2$ ）高（即“逻辑 1”或 TTL 逻辑电路为 5V）时，“与非”门的输出是低的（即 0V 或“逻辑 0”）。输入信号的任何其他组合将导致“与非”门的输出为高。这样，若圆盘上的黑色标志开始位于光断续器的槽中，光敏晶体管的集电极电压约 5V，因而  $S_1$  高。此外，若设计成单触发和反回跳电路，则其输出通常是高，只有单触发电路接地的起动开关触发时，其输出是低，通常  $S_2$  也是高。所以，到电动机驱动电路的信号低，电动机不转动。

如图 3.4 所示，压下起动开关时， $S_2$  低并使  $S_3$  提高。电动机开始转动并连续工作，直到黑色标志再次遮断光，使光到达光敏晶体管的基极。



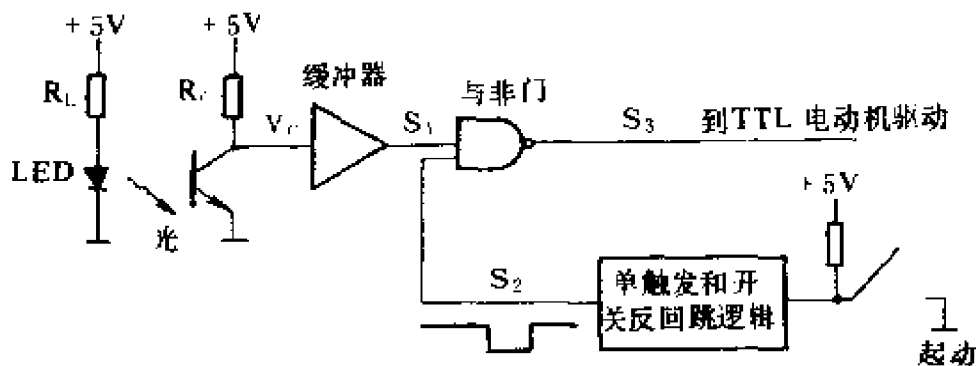


图 3.3 图 3.2 的简单电动控制器用传感器和逻辑电路可能实现的原理图

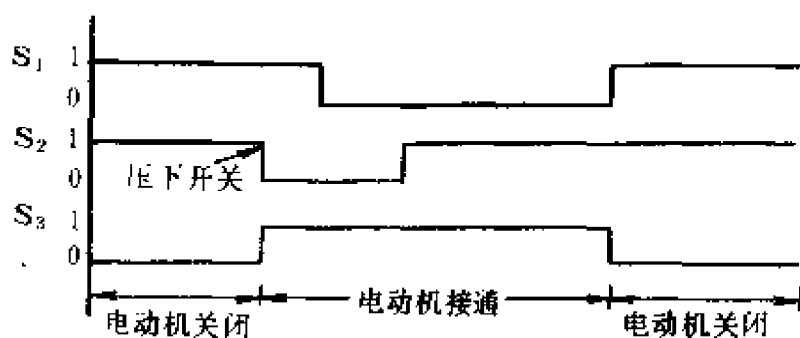


图 3.4 图 3.3 的传感器和逻辑电路数字信号用时序图

这种简单电路只能使电动机定向转动。若用它驱动简单机器人轴，则机械手被限制在一个方向运动。产生双向运动需要更复杂的电路。这种机器人只有单个端点受到限制，若盘上适当位置设置一个以上的标志，则可获得多个端点。编制这种机器人轴的程序是由在适当位置上产生具有适合标志数的特种盘构成。

## 3.2 光学编码器

光学编码器是一种广泛应用的位置传感器，其分辨率完全能满足机器人的技术要求。这种非接触传感器可分为绝对型和增量型。前一种情况，只要电源加到用这种传感器的机电系统，编码器就能给出实际的线性或旋转位置。因此，绝对型编码器装备的机器人关节不要求校准，只要一通电，控制器就知道实际的关节位

置。增量型编码器只能提供跟某基准点对应的位置信息。所以,用增量型编码器的机器人在获得真实位置信息以前,首先必须完成校准程序。线性或旋转编码器都有上述两类,但旋转型器件在机器人的应用中特别重要,因为机器人的旋转关节远远多于棱柱形关节。线性编码器成本高,甚至以线性方式移动关节,如球形坐标机械手那样,都用旋转编码器。

### 3.2.1 旋转绝对型编码器

如上述,绝对型编码器即使发生电源中断也能正确地给出旋转位置。器件产生供每种轴用的独立的和单值的码字,它不象增量型编码器,每个读数都与前面的读数无关。绝对型编码器最大的优点是系统电源中断时,器件记录发生中断的地点,当电源恢复时它把记录情况通知系统。采用这类编码器的机器,即使电源中断导致旋转部件的位置移动,校准仍保持。

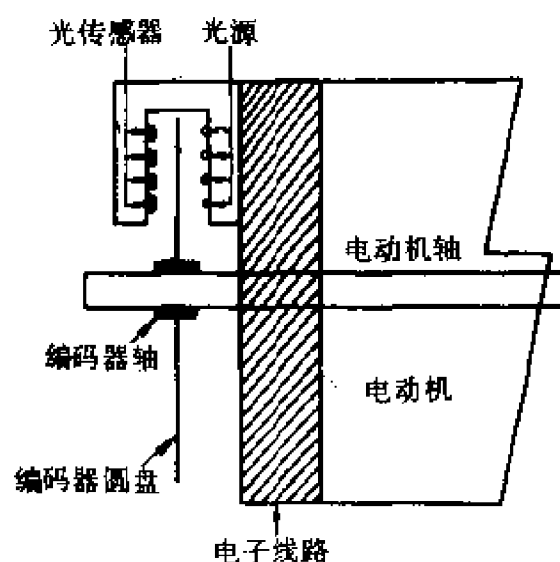


图 3.5 电动机上的绝对编码器

绝对型编码器通常由三个主要元件构成:

- (1) 多路(或通道)光源;
- (2) 多通道光接收器;
- (3) 多路旋转盘。

$N$  个 LED 组成的线性阵列发射的光跟盘成直角,并由盘反面对应的  $N$  个光敏晶体管构成的线性阵列接收,如图 3.5 所示。盘分为周界通道和径向扇形面。利用几种可能编码形式之一获得绝对旋转信息,如图 3.6 所示

四个通道十六个扇形面的纯二进制编码盘。还可采用其他编码方案,包括二~十进制码(BCD)和格雷码。由图 3.6 可见,盘旋转一周为  $360^\circ$ ,并有 16 个扇形面,故盘的分辨率为  $22.5^\circ$

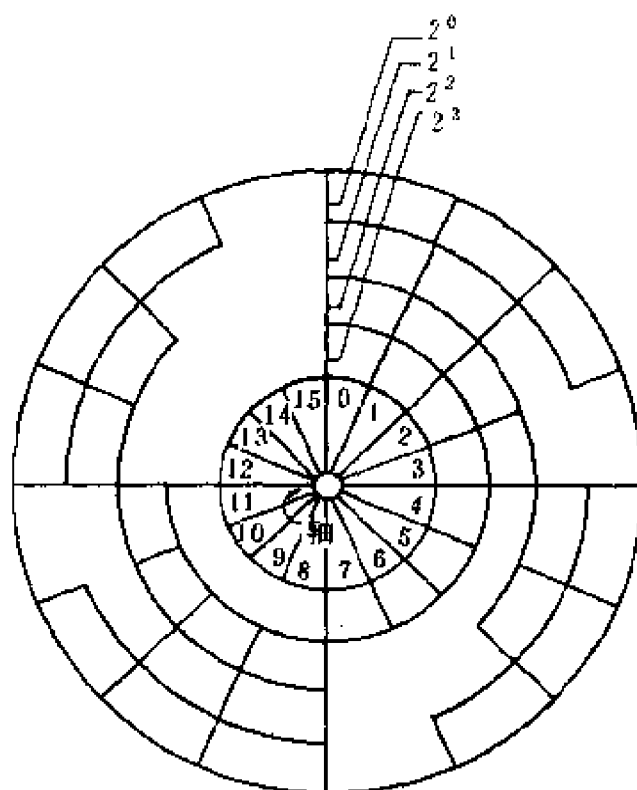


图 3.6 用于绝对编码器的 4 通道、16 个扇形面纯二进制编码盘 ( $360^\circ/16$ )。若阴影部分表示二进制“1”，明亮部分表示二进制“0”，那么，四个光传感器的每个输出表示一和零的四位程序。图 3.6 所示二进制编码，这种数字的等效十进制是实际的扇形面数。例如，若扇形面 11 是在 LED 区域，则光敏晶体管的输出是二进制 1011 或十进制 11。因此，通过读出光电探测器输出便可简单地知道绝对盘的位置。

对于 13 个独立通道 (即 13 位) 的绝对编码器，盘旋转一周能获得高达  $360^\circ/2^{13} = 0.044^\circ$  的分辨率。然而，用编码器监控的器件通常需要经受许多次旋转，二进制编码序列盘每转一周重复一次。在这种情况下，可使用与第一个盘同轴的第二个盘，但要减小速度，以便第一个盘旋转一周而第二个盘仅移动一个扇形面的距离。第一个盘用于获取单轴旋转的绝对位置信息，第二个盘给出实际转数。

绝对型编码器记忆位置的能力在机器人应用领域十分引人注目

目，但因其成本高而未获得广泛应用。例如，一个 10 位绝对型编码器高达几百美元，而增量型编码器只需要 80~100 美元。所以，许多机器人仍采用增量型编码器。

### 3.2.2 光学增量型编码器

如前述，光学增量型编码器广泛用于监控机器人的关节位置。它们还是车床、 $x$ - $y$  工作台、电子片式线路和混合模片粘接器用传感器。这种编码器的成本比绝对型编码器的低，而分辨率高。然而，只有首先机器人或其他机床完成校准操作才能获得绝对位置信息。通常，这不认为是很大的缺点，因为这样的操作一般只在加上电源后才能完成。若在操作过程中电源意外地消失，因为增量型编码器没有“记忆”功能，故必须再次完成校准。

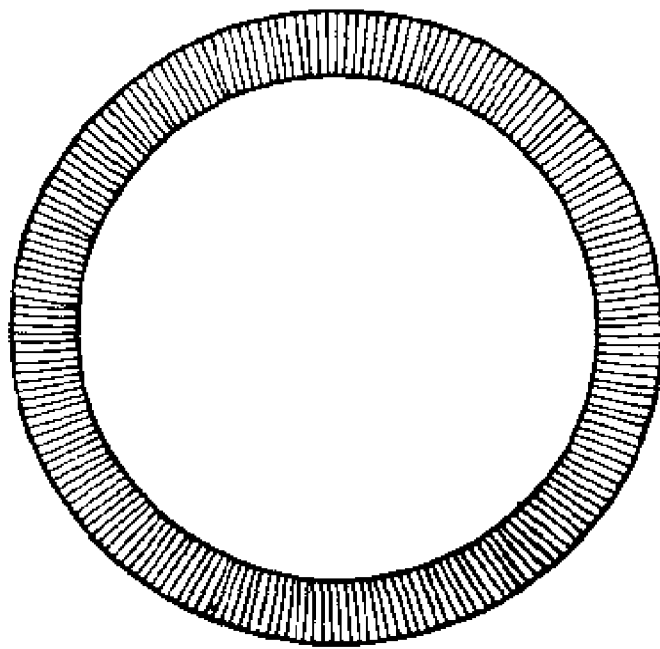


图 3.7 具有 200 根径向线的增量型编码器(用这种器件可获得  $1.8^\circ$  的分辨率)

跟绝对型器件相同，最简单的增量型编码器由圆盘、LED 光源和对应的一组光接收器(光敏晶体管)构成。然而，两种编码器之间差别极大。例如，增量型编码器通常只有单个 LED 和四个光

电探测器。同样,薄环循器圆盘(一般用玻璃、聚酯薄膜或金属制作)含有一个由  $N$  根径向线构成的单通道,如图 3.7 所示。含有这种圆盘的编码器的分辨率通常由径向线数  $N$  来确定。这意味着编码器能分辨的角度位置等于  $360^\circ/N$ 。典型的具有 100、128、200、256、500、512、1000、1024、2000 和 2048 根线分辨率的编码器是可用的,也意味着可获得角度分辨率从  $3.6^\circ$  下降到  $0.175^\circ$ 。一般地说,机器人应用中 200~1000 根线圆盘是极适合的,需要定位的部件(或工具)精度在  $\pm 0.02\text{mm}$ (或  $0.05\text{mm}$ )以内。

若编码器圆盘装在旋转轴上(如图 3.5 所示的伺服电动机轴),那么,圆盘转动时,照射到光电探测器的光会被圆盘上任何一根线条遮断,光则在 LED 源的前面通过。可见,探测器的输出近似于正弦曲线波形。通常用一个比较器把这些信号变换成 TTL 脉冲,从而使这些信号适合数字系统。但会出现两个问题,一是虽然单个光电探测器每转产生  $N$  个 TTL 脉冲序列,但它不可能确定圆盘的旋转方向;二是由于光源和环境光强度的变化而产生困难。TTL 变换使用比较器,故脉冲宽度对探测器收集的光量十分敏感,这是一个不希望出现的条件,特别是在圆盘以高速(大于 500ppm)旋转的情况。

上述两个问题应用多重光传感器即可克服。例如,跟第一个光电探测器在电气上隔离  $90^\circ$  的第二个探测器将产生 B 通道输出,该通道除了输出信号跟最初的信号相位相差  $90^\circ$  的 TTL 信号外,其余跟 A 通道相同。观察 A 超前或落后 B(见图 3.8)便可确定电动机轴是顺时针或反时针旋转。

解决光强变化需要附加光传感器。为了弄清这种解决方法,可参考图 3.9 所示的单通道编码器(仅示出圆盘局部放大部分)。如图所示,光传感器前面安置一块固定板,其中有许多隙缝(即线条),编码器圆盘上约 20 根线条的光通过隙缝照射到单个光电探测器。减小污染物和线条位置变化对编码器灵敏度的影响可改进性能。

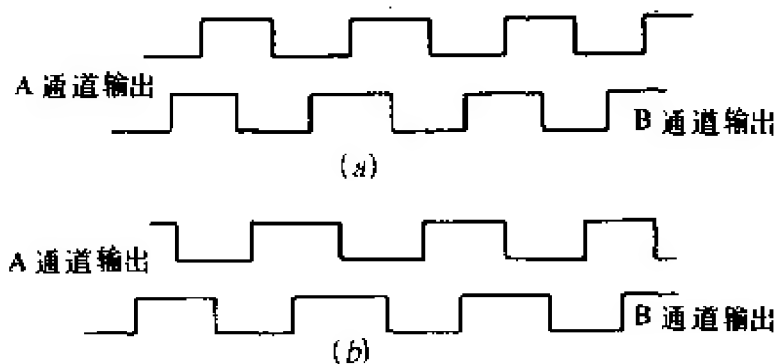


图 3.8 增量型编码器 A 和 B 通道的 TTI 输出

图 3.8 增量型编码器 A 和 B 通道的 TTI 输出

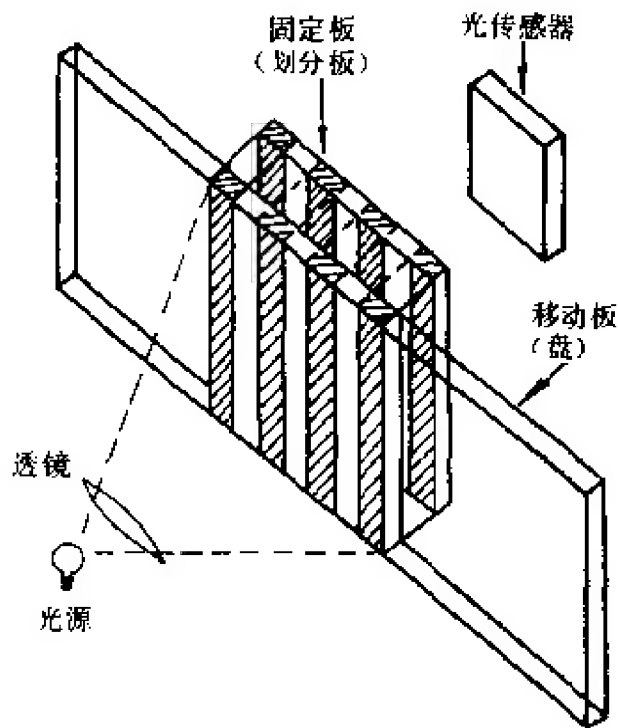


图 3.9 单通道编码器的截面图

圆盘旋转时，光传感器输出电压理论上是按三角波形变化，如图 3.10 所示。实际上，波形接近正弦曲线，这是因为光阀装置（即圆盘和划分板）的线条宽度有限。传感器最大输出电压  $E_{max}$  跟 LED 的光强度成比例。因为光不能完全由光阀准直（即总有一定的光泄漏），故最小电压  $E_{min}$  不为零，但降低光阀和光源之间的间隙（0.025~0.25mm）能使该电压值减至最小。传感器输出的有用

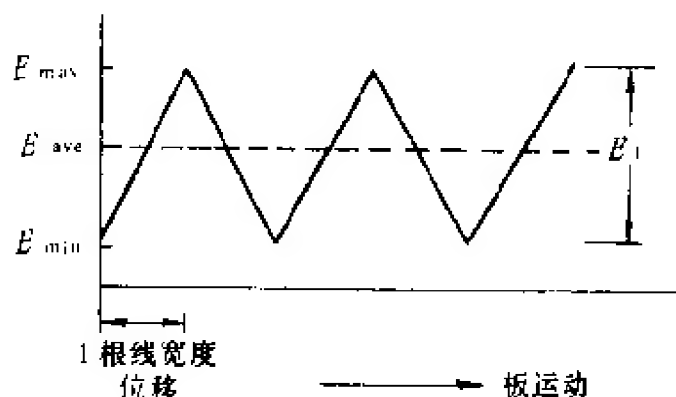
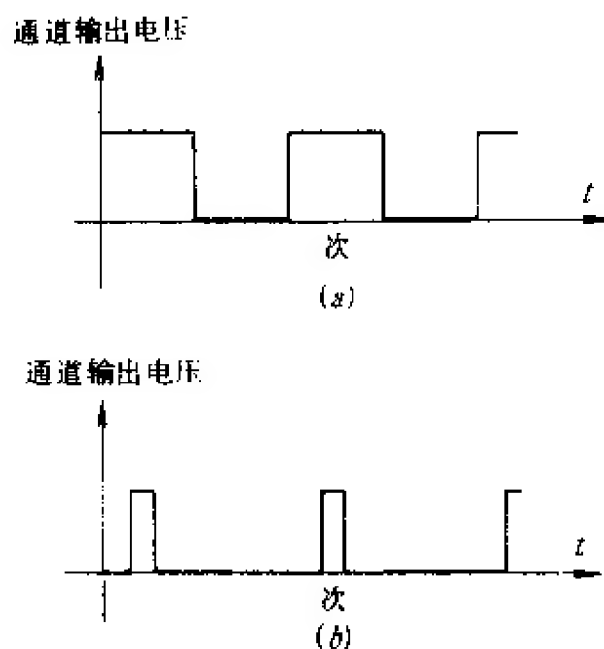


图 3.10 编码器圆盘相对于划分板移动时,图 3.9 中传感器的输出电压

成分是峰-峰值  $E_1$ , 故这样做是合适的。



(a)理想的 50% 占空比; (b) 传感器电压平均值  $E_{ave}$  漂移造成占空比不是 50%

图 3.11 单编码器通道 TTL 输出。假设圆盘以恒角速度旋转

若用比较器将传感器输出信号数字化,则 TTL 脉冲使电压高于平均值  $E_{ave}$ 。理论上讲,圆盘以恒定速度旋转会产生 50 % 占空比的脉冲序列(见图 3.11(a)),但是若  $E_{ave}$  因 LED 和环境光强度变化或光电探测器灵敏度变化造成漂移(因升高温度或高频操作

造成),则脉冲将不再有 50% 的占空比,如图 3.11(b)所示。这种情况低速下不成问题,但高速应用中会使脉冲变窄以致产生敏感误差。

这个问题可通过跟第一个传感器相位差  $180^\circ$  的第二个传感器克服,如图 3.12 所示。同样光源照射两个传感器,若两个光电探测器的输出连接成推挽式,以便两个信号相减,从而产生以零为中

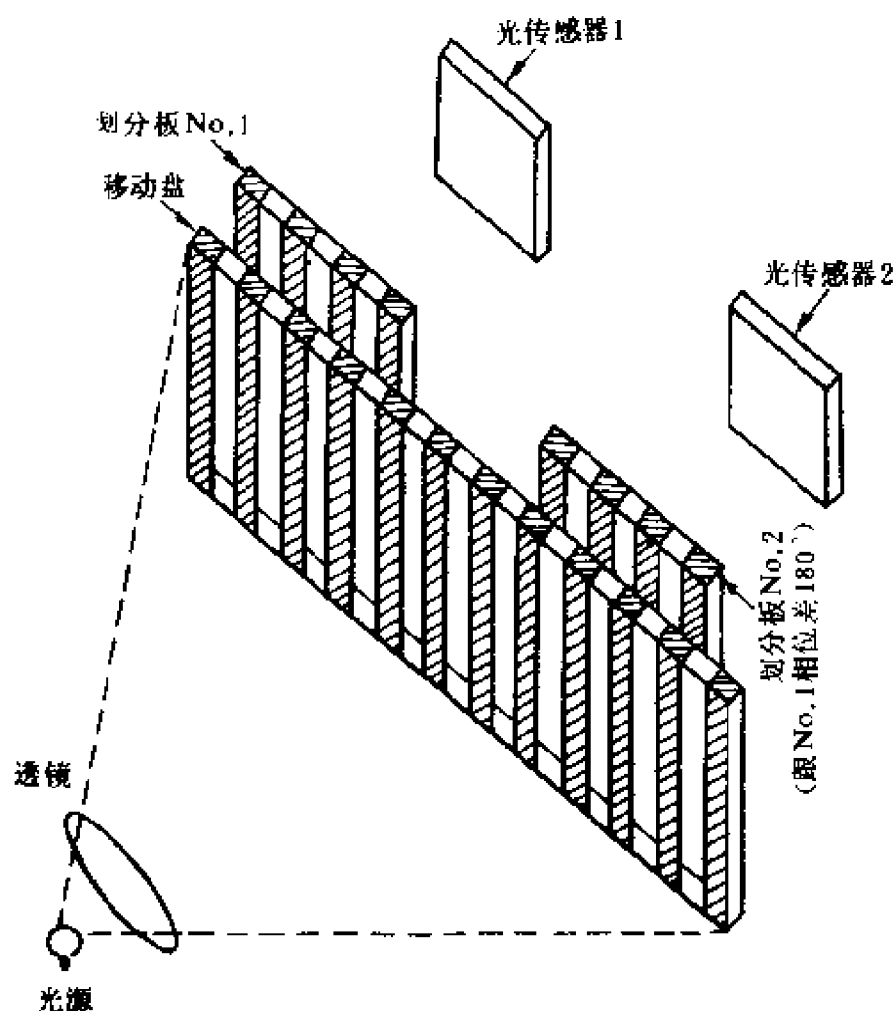


图 3.12 采用同样光源的两个传感器降低编码器输出平均值  $E_{ave}$  的变化

心的三角波形和接近一个信号两倍的峰-峰幅值(见图 3.13)。实际上,两个传感器的差异导致平均值跟零略有差别,这是次级效应,将偏压加到差分放大器上即可抵消。



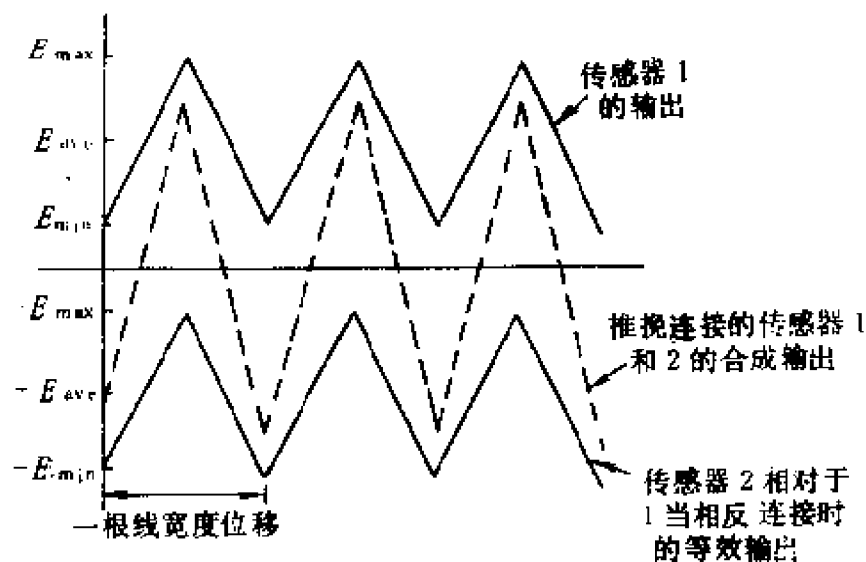


图 3.13 两个传感器的推挽输出。这种结构有效地降低在 TTL 占空比平均值漂移的影响

推挽式结构比单个传感器具有更多优点。因为光传感器受到相同的影响，故光学编码器对光电探测器输出平均值的变化不灵敏。脉冲间隔变化(恒速下)降低约 1/2，单个传感器在平均光强下有同样漂移。此外，因为两个传感器都再次受到同样程度的影响，故温度和频率的影响都减至最小。

如前述，单个传感器编码器不能给出旋转方向的信息。采用跟第一个探测器相位差  $180^\circ$  的第二个光电探测器也不能改变这种情况，获得的编码器仍然是单通道器件。为了测定方向，必须采用跟第一组相位差  $90^\circ$  的第二组光传感器，如图 3.11 所示。图

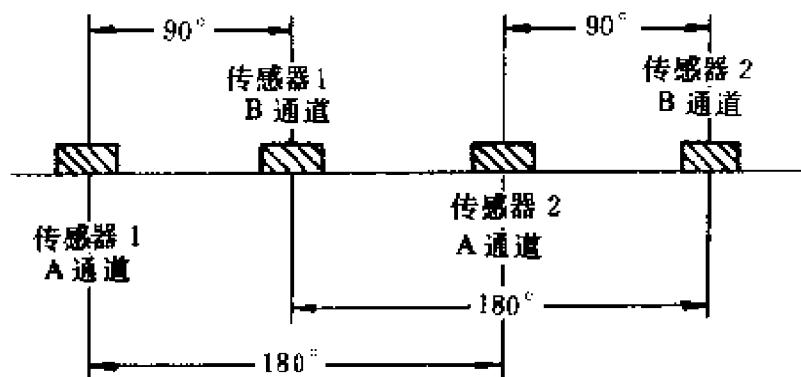
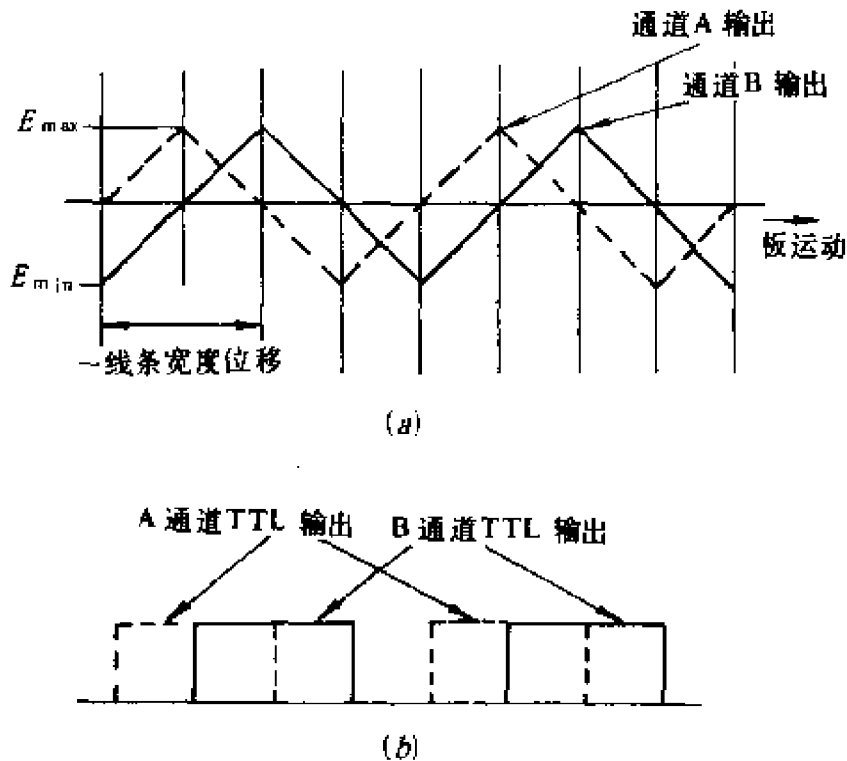


图 3.11 相隔  $90^\circ$  的两组传感器用于测定旋转方向

中(推挽)第一组输出为 A 通道,第二组输出为 B 通道。典型的两通道输出如图 3.15 所示。使用图 3.8 所示的同样变换,图 3.15 中的位置为顺时针(CW)圆盘旋转。



(a)“推挽”三角信号;(b)数字信号,A 通道超前 B

图 3.15 两通道增量型编码器的输出

### 3.2.3 用电子学方法提高增量型编码器分辨率

光学编码器的第二个通道除了能测定旋转方向外,还有提高分辨率的功能。有  $N$  根线条的圆盘分辨率为  $360^\circ/N$ 。然而两个通道中包含的信息用电子学的方法减少  $1/2, 1/4$  或甚至更多(实际上已经减少高达  $1/20$ )。下面提出一种光学增量型编码器分辨率提高二倍和四倍的方法。

**二倍分辨率** 用单个双输入“异-或”逻辑门得到  $\times 2$ (乘 2 倍)电路,从而使编码器有效线条数加倍。另一种完成  $\times 2$  电路并能同时检测方向的方法是用反馈结构中的 ROM(见图 3.16)。对于  $16 \times 4$  位 ROM 来说,两个最重要的输出(数据)  $D_2$  和  $D_3$  分别反馈

给两个最重要的地址线  $A_2$  和  $A_3$ 。两个最少的数据位送到升降计数器的递增计数(CU)和递减计数(CD)输入。为了弄清这种电路如何工作,假设顺时针方向旋转在 CU 线上产生一个脉冲,反时针方向旋转在 CD 线上产生对应的脉冲。表 3.1 列出 ROM 数据中的一部分。

表 3.1 ROM 数据表

	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	注 释
1	1	0	1	0	0	0	1	0	稳 定
I	1	1	1	0	1	0	1	1	不稳定
II	1	1	1	1	0	0	1	1	稳 定
3	1	0	1	1	0	1	1	0	不稳定
V	1	0	1	0	0	0	1	0	稳 定

步计数或发生地址偏移，除非编码器圆盘继续旋转。

采用上述同样的逻辑，通过数据表中第Ⅲ行开头和CCW旋转编码盘，可看出CD线上产生一个短持续时间脉冲。第Ⅳ行表示一个不稳定位置和使地址很快的从1011变到1010(第Ⅴ行)，这样，就可完成ROM余下的12个数据表列值。因而，圆盘的CW或CCW旋转会产生一个适当的上升或下降计数。

**四倍分辨率** 上述 $\times 2$ 电路能有效地认识编码器A和B通道给出的脉冲。但是，圆盘上的每一根线条实际上产生四个边缘(或转变)，通过简单计数这些边缘分辨率可提高四倍。图3.17示出提高编码器分辨率四倍的电路。

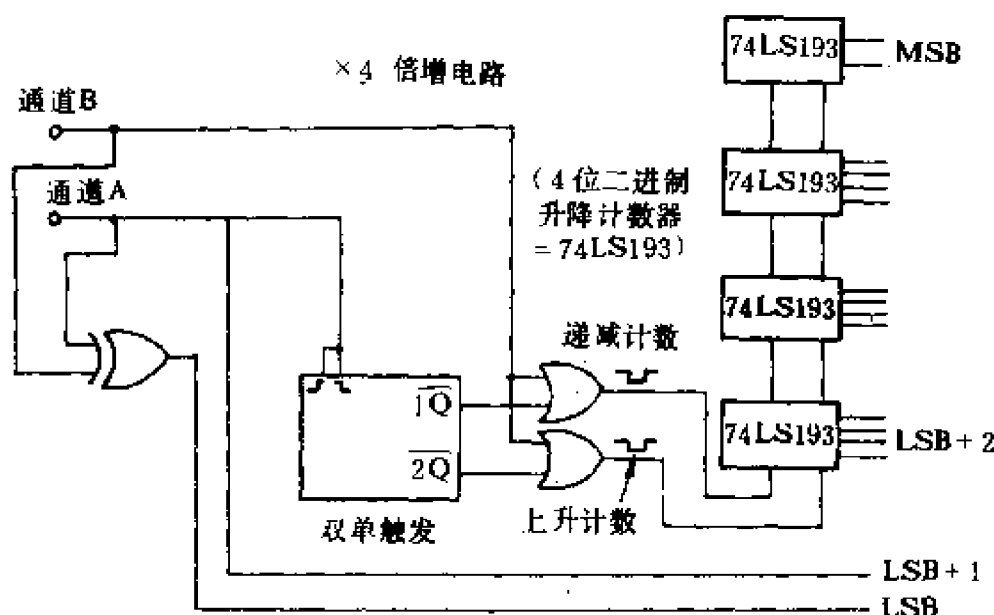


图 3.17 提高编码器分辨率四倍的电路

为了弄清这种电路的工作，图3.18示出一种涉及圆盘CW运动的定时图。若16位计数器(用四个4位二进制升降计数器芯片来实现，该芯片响应CU或CD输出的负边缘)最初是清零的(即它的计数是0，因此LSB+2一直到MSB都低)，则从图3.17可看出，通过“异-或”逻辑A和B通道信号可获得计数的LSB，而LSB+1正是A通道信息本身。此外，还观察到每个编码器的线

条产生的递减计数脉冲(见图 3.18 中  $1\overline{Q}+B$ )。

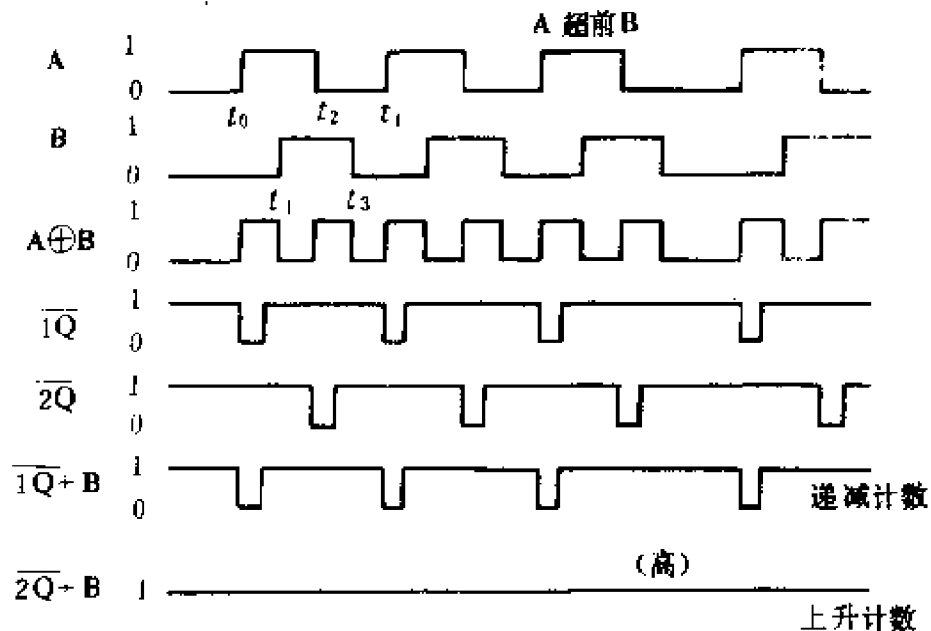


图 3.18 图 3.17 所示  $\times 4$  电路的时序图

由图 3.18 可看出, 在  $t_0$  前因 A 和 B 都低, 而最重要的 14 位假设为零, 故位置计数为零。在 A 通道第一个脉冲前沿(在  $t_0$ ), LSB 和  $LSB+1$  都为 1, 并因为也产生递减计数脉冲, 故最重要的 14 位也从 0 变到 1。十六进制计数从 0000 改变到 FFFF。第一个 B 通道位置边缘(在  $t_1$ )造成  $A(XOR)B$  降低, 意味着  $LSB=0$ ,  $LSB+1=1$  和十六进制计数为 FFFE。A 通道上(在  $t_2$ )第一个负边缘在 XOR 门的输出上产生 1, 十六进制计数为 FF FD。B 通道上第一个负边缘(在  $t_3$ )产生的 LSB 和  $LSB+1$  都为 0。产生的另一个递减脉冲, 在第一个编码器线后十六进制计数为 FF FC。显然, 分辨率增加了四倍。

如上述, 使光学增量型编码器的分辨率增加 4 倍以上是不可能的, 但需要光电探测器产生正弦曲线波形。这些信号通过适当增加或减少, 从而获得跟最初信号相比相位不同的附加信号组, 该信号组产生信息的附加通道。然后, 进行 TTL 变换, 利用跟图 3.17 所示相类似的电路时, 每个编码器线计数增加。实际上, 使用额外

信号产生用适当数字电路可计数的“更多边缘”。为了避免敏感误差,使这种类型的高分辨率设计的计数下降,故必须保持 A 和 B 通道之间的四倍关系。

### 3.3 光学增量型编码器校准机器人

光学增量型编码器往往是机器人选用的位置传感器。从表面上看,增量型器件不能获得绝对位置信息,但事实上,至少有下列两种方法可用增量型器件代替绝对型编码器。

#### 3.3.1 零基准通道

用增量型编码器的困难是它仅给编码器圆盘单个旋转提供位置信息。因为几乎所有机器人轴都要求致动器(例如何服电动机)必须完成 100 转以上,才能使关节本身旋转一周,故必须有保持跟踪转数的某种方法。这样做亦不困难,例如,一个旋转计数器可完成 300 根线的编码器,每时每刻都可计数 300 根线。旋转计数是增加还是减小取决于轴的旋转方向。

上述方法的主要问题是停电条件下,数字系统不知道所敏感的“旋转”。通电时,全部信息都与机器人所处位置相对应。因此,需要某种校准或起动系统的方法。完成这种校准最通用的技术是把一个信息通道增加到编码器圆盘上。通道称零基准通道,它由一根精确的线条和每次编码器转动产生的单个标志脉冲构成。显然,立即计数这些脉冲可提供有关转数的信息,这是该通道的第一个作用。

零基准通道的第二个重要作用是校准机器人轴。机器人通电时,每个关节在预定方向朝轴上机械端点以恒速移动。致动器连续转动直到碰到端点才停止。这种停止通过采用编码器和在一个短时间间隔找出位置能容易地检测出,且计数不改变。这里不需要知道绝对值,仅需要现在的计数与以前(如 100ms 前)获得的

相同，一旦系统识别到轴已达到它移动的机械端点，致动器反转并持续到产生第一个标志脉冲为止。在该点计数器恢复到零。以后的运动则以该校准点为基准，可通过读出编码器计数和积累的标志脉冲数获得绝对位置。

值得注意的是，并不总是需要利用标志脉冲来获得绝对位置信息。如前所述，校准程序通过使每个轴移动直到它达到自身机械端点停止才开始。在该点，注意编码器计数和致动器反转方向。在这种情况下，运动只有在编码器计数已经积累到特定数之后才停止（相对于端点停止值）。最后，恢复计数，因而完成相位校准。

这种校准程序用于现代机器人还有一些问题，例如，温度和线电压波动对校准点有影响。但是，该问题可通过除去零基准通道获得的低成本相权衡。从成本考虑，机器人采用这种设计引起人们的重视。

### 3.3.2 采用电位计和增量型编码器的绝对位置

在绝对位置应用中利用增量型编码器的第二种技术，是使用电位计和编码器。如前所述，机器人中使用电位计作位置传感器，其固有的电噪声会引起严重的可靠性问题。但是，采用电位计和编码器取得的精确位置信息，可解决这个问题。

在实际操作中，电位计跟光学编码器圆盘装在相同的轴上。用  $N:1$  齿轮减速的多转器件，才能使  $N$  个致动器转动产生电位计游标的单旋转。无论使用哪种设计，电位计电压分为  $N$  个不连续的值，每个值对应于特定致动器的转数，并存储在系统存储器的表中。实际电位计电压跟表列数据进行对比，便可确定特殊的转数，这便是近似的位置信息。然后，正常情况下使用编码器计数可获得在任何特殊旋转之内的精确位置。

这种设计避免了使用电位计的主要困难，即避免了游标滑动接触引起的噪声造成的位置误差，因为电位计仅监控一组不连续的位置（即致动器转数）。电位计的输出电压在理想值的  $\pm 1V/2N$

范围内就不会造成误差,这里  $V$  是加给电位计电阻的直流电压。用这种方法系统有抗扰性。显然,噪声电平超过  $\pm 1V/2N$  时,必须更换电位计。为此,通常采用薄膜器件,以便增加这种更换器件之间的工作时间。

这种混合设计的重要特征之一是机器人可在工作空间几乎任何位置进行校准。控制器首次通电时,轴致动器指令旋转,直到敏感到每个编码器的第一个标志脉冲。然后,读出电位计电压,并通过检查表中数据确定特定致动器的转数。在该点,位置计数器接近恢复,这样就完成了校准。例如,若电位计电压对应于第十个致动器旋转,则位置计数的旋转部分调到 10。显然,因为标志脉冲刚读出,故编码器计数恢复到 0。

电位计在完成校准后可用于确定转数,但并不经常用。为此目的,使用无噪声的标志脉冲,并应用电位计会增加误差概率。因此,电位计仅是校准过程中一个影响因素,使用它的主要作用是获得初始的绝对位置。

这种系统跟纯数字/机械端点停止技术比较有两个主要缺点。第一个缺点前面已经提到,也就是需要更换电位计,使用混合设计时,还需要经常维护。第二个缺点是位置在工作空间内,在那里机器人未触及它的关节就不能完成校准。在这种情况下,降低功率,并人为地移动不精确的关节,使其到工作空间内较好的位置。值得注意的是,当机械端点停止是校准程序的一个组成部分,如上所述的纯数字方法一样的情况时,这一步骤就不需要。

上述两种技术之间的主要区别是机器人控制器首次通电时,利用混合设计的系统知道它在的地方并很少出现误差。另外,应用纯数字技术(用端点停止)的系统知道曾经在哪里完成校准。不校准的机器人用处不大。不管应用的设计如何,校准必须在工作前完成。



### 3.4 增量型编码器导致的不稳定性

### 3.4.2 位置伺服的模拟锁定

上述数字跳动是由于误差信号的不连续性或量化性质所致。显然,若该误差是连续的则不会发生这种问题。在这方面,模拟位置传感器(如电位计)的优点是它能产生一个连续的信号,即可用于防止数字跳动。然而,电位计也有其他的问题使得它不适合用于精确定位,如机器人定位。幸运的是,编码器能用于解决这个问题。

如前所述,用于光学编码器的光电探测器输出跟正弦曲线近似。这种关系可用于消除数字跳动。在正常操作条件下(即运动过程中),“纯”或正弦曲线的信息变换成 TTL 脉冲,故编码器的数字特性保持不变。达到最终要求的位置时,利用纯编码器信号提供要求的模拟信息。输入到伺服的数字指令断开,并被零的模拟电压所取代,这就是模拟锁定的设计。

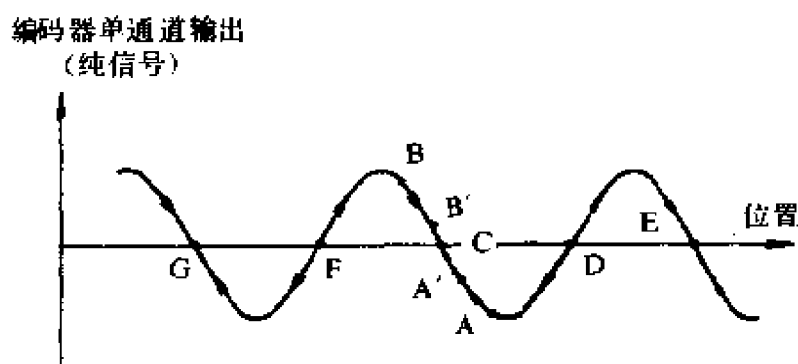


图 3.19 编码器单通道用“纯”信号。用于位置伺服时,D 和 F 点“不稳定”,而 C、E 和 G 点稳定,如箭头所示

为了弄清如何进行模拟锁定,这里考虑前述保持水平的有载机器人关节的位置。轴一开始离开要求的内部位置转动,就立即敏感到误差信号,并产生一个恢复的转矩,从而使关节返回到内部(见图 3.19)。若重心使关节移动到 A 点(或 B),则产生一个非零的误差信号,该信号足够大到在一个方向驱动关节,从而减小这个误差。若从光电探测器来的电压用增益放大器放大,则会严密

伺服。在这种情况下关节的小角度转动就会产生要求的误差驱动，使现在的 A 点（或 B）成为 A'（或 B'）。这样，系统就极快速地敏感误差，也就是更加接近对应于编码器线 K 最靠近的 C 点，即是跟要求的最终点最接近的一点。通过提高放大器的增益，我们可使 A' 几乎跟 C 一致。

D 点和 F 决不会“保持”它们的不稳定位置。模拟锁定设计在未采取措施预防以前，它会产生一个全编码器线的误差。

关节机构的摩擦足以限制循环，故大多数机器人伺服不需要模拟锁定。但是，高性能机器人需要降低摩擦和阻止数字跳动。实际上，在其他高精度定位装置（如高速引线接合器）中这一问题已解决。

## 第四章 触觉传感器

何谓机器人触觉传感器？1980年 L. Harman 等人认为机器人触觉传感器应具备如下特征<sup>[1,3]</sup>：

(1) 空间分辨率为  $1\sim 2\text{mm}$ 。这种分辨率接近一个最小距离，在该距离内人指尖可区别皮肤上用作分离刺激的两点；

(2) 阵列尺寸是每个指尖有  $5\times 10\sim 10\times 20$  个点(人的指尖有约  $10\times 15$  个接触敏感点)；

(3) 一个力敏元件的阈值灵敏度约  $0.5\sim 10\text{G}$ ；

(4) 传感器的稳定性、线性度和重复性好，无滞后；

(5) 取样频率  $100\text{Hz}\sim 1\text{kHz}$ ；

(6) 概括地说，传感器结实、价廉，类似皮肤。

上述技术要求是设计机器人触觉传感器的依据，但对特殊应用的触觉敏感仪这些要求还不够。

### 4.1 力、压力和剪切力

若一个恒定的力加到力传感器的敏感区，则传感器产生恒定的输出。传感器输出不受接触面积变化或接触区力分布的影响。相比之下，若所加的力是恒定的，则压力传感器的输出跟接触面积成反比，故接触区力的分布影响传感器的响应。本章涉及的大多数触觉传感器属于力传感器和压力传感器范畴。

物体在抓爪中的滑动趋势可通过切线方向作用于皮肤表面的剪切力进行监控，故关于剪切力的信息对监测和控制滑动十分重要。下章论述的滑觉传感器都是利用剪切力敏感滑动趋势。

## 4.2 触觉传感器开关

开关是用于检测物体是否存在的一种最简单的触觉-致动器件。开关内部分隔成两个电接点。一个电极上承受阈值力时,该电极跟另一个电极接触,这样产生的电流流向表明阈值力超出原定值。工业上利用小型开关阵列可形成一种价廉的触觉传感器。但是,即使最小的开关其外形也十分大,并且这种阵列的空间分辨率低。这种跟输出信号的二进制(只发“开”或“闭”信号)性质相结合的局限性,严重地限制这一阵列可提供的信息量。

尽管如此,利用开关阵列这一概念已开发了许多重要的有用传感器。

### 4.2.1 气压触觉传感器

计算机键盘和质量好的计算器一般都有触觉的键,这种键减压时能发出听得见的咔嚓声。在许多情况下,咔嚓声由薄片金属制作的线球形罩发出。

一个临界值的力加到线球形罩上时,球形罩塌陷(带有咔嚓声),但力消失后,罩又回复到它原来形状。薄金属罩在外加负载下其特征由弹性弯曲理论描述。图4.1示出线球形罩的截面图。几何参数 $\lambda$ 由

$$\lambda^2 = \frac{a^2}{t \cdot r} \sqrt{12(1 - U^2)} \quad (4.1)$$

给出,负载参数 $R$ 由

$$R = \frac{P}{E} \left( \frac{a}{t} \right)^4 (1 - U^2) \quad (4.2)$$

给出,式中 $P$ 是外加的压力; $E$ 是薄片金属材料的杨氏模量; $U$ 是薄片金属材料的泊松比。

快速开关产生的动作, $\lambda$ 在2.08和6之间, $\lambda$ 小于2.08时,球

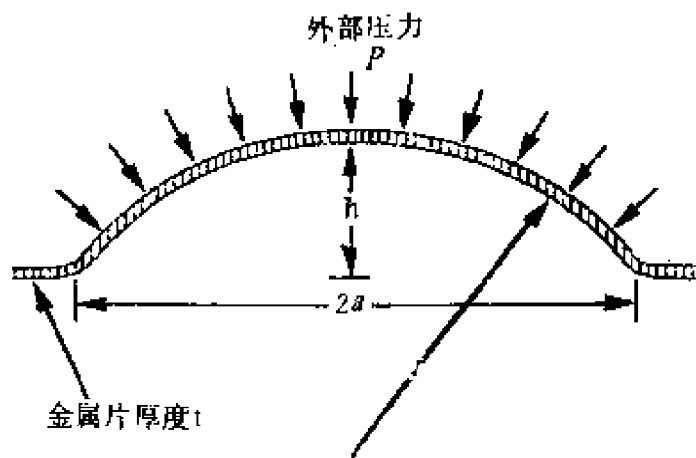


图 4.1 薄片金属球形罩的几何形状

形罩连续变形(无咔嗒声), $\lambda$  大于 6 时,球形罩以极复杂的形式弯曲。

球形罩进行快速开关要求的压力  $P$  可从式(4.2)求出。式(4.1)和(4.2),以及表 4.1 可用于选择球形罩的材料和几何形状。

表 4.1 启动球形罩快速开关对应的几何  
形状参数值  $\lambda$  和临界负载参数  $R_c$

$\lambda$	2.08	3	3.5	4	5	6
$R_c$	2.46	4.1	8	14	33	77

球形罩开关阵列制作在计算机控制抓爪的表面,在每 2.54mm 行和列间隔上有 100 多个单元。图 4.2 示出气动触觉传感器的截面图。

快速动作的球形罩触击金属薄片,金属薄片形成全部开关的共用电连接。由橡皮或聚氨基甲酸酯外层提供电绝缘和高摩擦的抓爪表面。外力使球形罩塌陷,并使它跟有关的电极接触,从而形成电路。传感器的灵敏度可在计算机控制下改变,借助增压流体或气体源给开关施加背压,从而调整开关阈值。

为了行和列寻址,开关阵列需要互连。为此,每个开关需要串联象二极管之类的附加元件,才能消除寄生电导路径。气动触

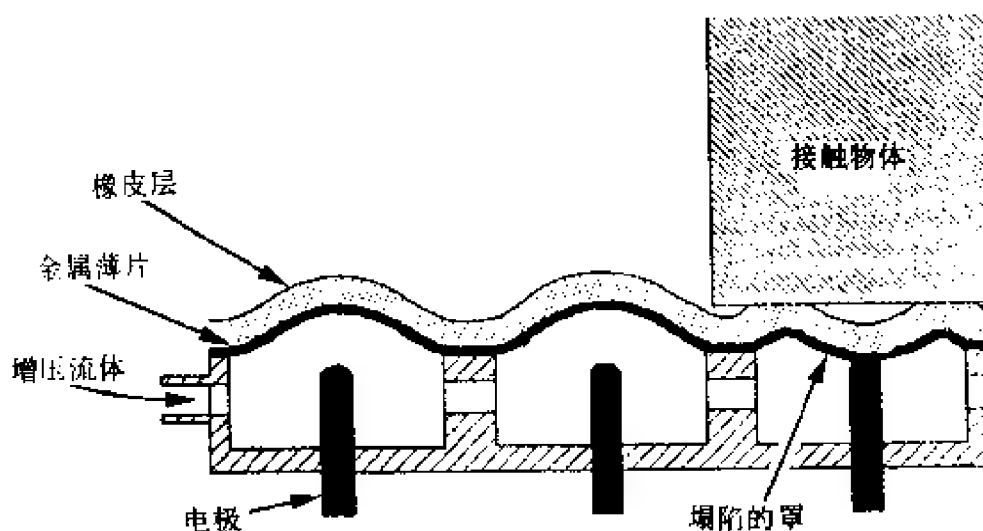


图 4.2 气动触觉传感器的截面图

觉传感器于 1973 年报道，迄今尚未获得进一步发展。这种传感器还存在如下问题：

- (1) 由于物理尺寸限制，该传感器难以减少开关元件之间的间隔，而这种间隔是改进空间分辨率的关键；
- (2) 若加到球形罩的力有剪切成分，则它会防止球形罩由于快动作造成的弯曲；
- (3) 金属薄片罩容易损坏；
- (4) 开关元件滞后大；
- (5) 开关的二进制输出跟连续可变输出的传感器比较，前者给出的信息量少得多。

#### 4.2.2 数字触觉传感器阵列

一个简单的开关可指示外加的压力/力是否超过设置的阈值。若能制成一个精密分类的开关阵列，其中每个开关有不同的阈值，那么，这样的阵列便可检测外加压力或力的大小。传统的开关由于其外形尺寸太大及其阈值不能调节，故不适用。

在上述概念基础上的触觉传感器阵列采用 VLSI 技术构成。若将一弹性材料片对着一个圆孔加压，则材料会挤进孔内。对于

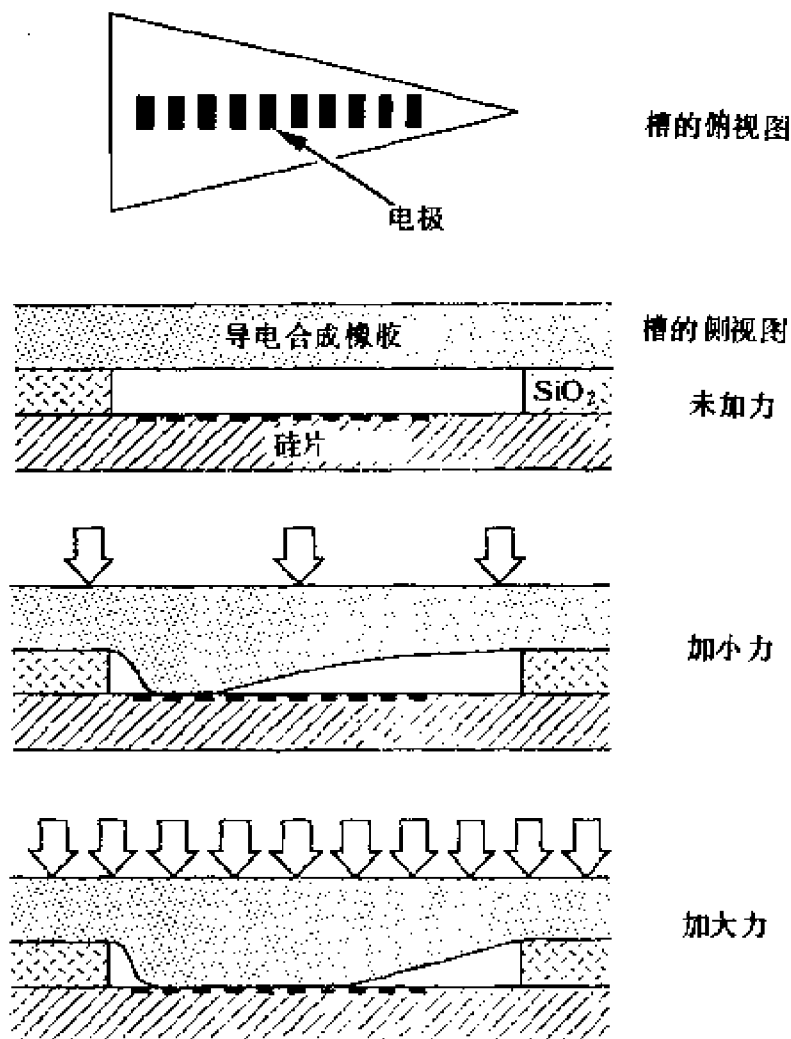


图 4.3 全数字 VLSI 触觉阵列传感器

小的变位，材料挤进孔内的最大深度跟施加的压力、孔的尺寸和材料片的弹性模量有关，即

$$\delta \propto \frac{Pa}{E} \quad (4.3)$$

式中  $\delta$  是弹性材料进入孔内的最大变位， $P$  是外加的压力， $a$  是孔的半径， $E$  是材料片的弹性模量。

如图 4.3 所示，一弹性材料片对着 V 字形槽口加压，槽口宽度狭窄时，只有大的压力才能使弹性体压入槽口。这种方法用于构成最小开关阵列，其中每个开关的压力阈值不相同。这种开关



阵列是把槽口腐蚀到硅集成电路的玻璃表层内( $\text{SiO}_2$  保护层)构成。沿槽底部沉积的一行铝垫片形成每个开关的电极,并用一导电合成橡胶片作共用电极。增大加到开关的压力时,弹性体挤入槽口并依次跟每个铝电极接触。传感器扫描电路集成到硅片内,以便检测每个开关的动态,并把这种信息作为比特串联程序从传感器转移。

已经报道的传感器样品有 48 个槽口,它们位于  $0.3 \times 0.6\text{mm}$  的基片内。15 个开关接点使传感器能辨别 16 个压力级。遗憾的是,由于导电橡胶片表面不平整,而使这种传感器不能可靠地工作。增加玻璃表面层的厚度可解决这个问题,缺点是槽口深度延伸。

这种传感器设计的优点是它不要求模拟-数字变换,从而能为数字计算机提供数据。改变槽口的形状可获得对压力的线性、对数或指数的响应。缺点是其他一些以硅为基础的触觉传感器是使用脆性硅片与外部物体的接点靠近,在该位置传感器容易损坏。硅片表面在很大程度上决定传感器的形状。制作与手指轮廓相符合的传感器有困难,传感器敏感区被限制在可制作的集成电路的最大尺寸内。

## 4.3 压 阻

### 4.3.1 导电合成橡胶

导电合成橡胶是在硅橡胶中添加导电颗粒或半导体材料(如银或碳)构成的导电材料。这种材料是用作触觉传感器的最初材料,其价格低廉、使用方便、有柔性,可用于抓爪表面。几种等级的导电橡胶在工业上用作电磁屏蔽和在小型电子产品中(如数字手表)用作柔性电接点。大多数这类导电橡胶变压时其体电阻的变化很小。但是,接触面积和反向接触电阻都随外力大小而变化。

1981 年 Hillis 论述的传感器应用了上述原理敏感正压力。隔离器(用尼龙材料编织的网)给出无接点接触,因而对法向力电阻是无穷大。在一定的阈值力下导电合成橡胶因隔离器被压扁,并跟一个电极接触。附加力增加接触面积,从而降低接触电阻。这种过程如图 4.4 所示

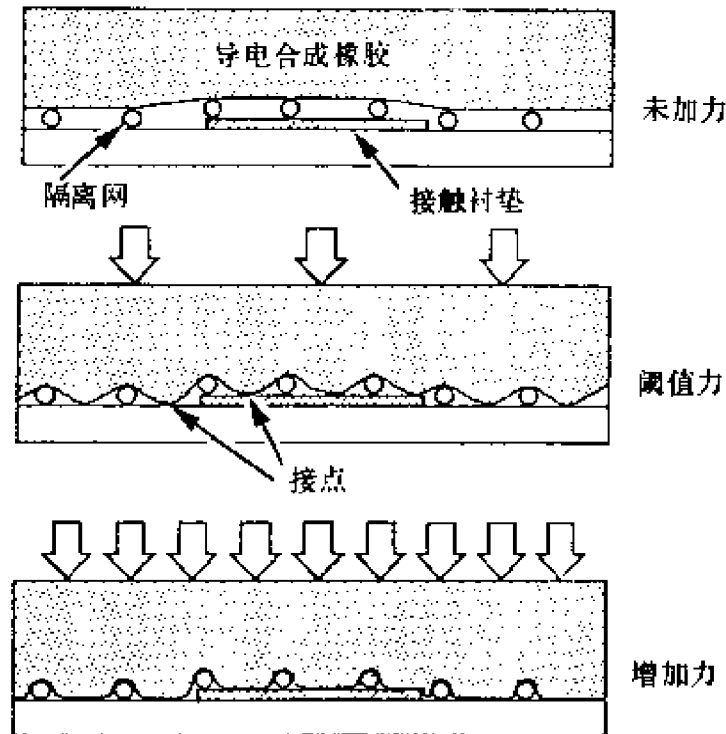


图 4.4 利用隔离器的压阻器

图 4.5 示出接触电阻随法向力变化给出的高度非线性和快速饱和响应。Hillis 的传感器使用各向异性的导电橡胶 ACS 来提供行电极和印刷电路引线的列电极。这种传感器在  $1\text{cm}^2$  面积内有 256 个触觉敏感元件,其敏感范围为  $1\sim 100\text{g}$ 。

1981 年 Purbrick 也报道了使用可变接触面积的类似方法。用形成行连接的 D-截面电线和列连接的导电带(或另一类 D-截面电线)构成的行和列寻址。如图 4.6 所示,增加正向力使 D-截面变形,从而行和列之间增加接触面积和减少接触电阻。

图 4.5 示出这种传感器的正压力跟接触电阻的关系曲线遵循的一般趋势。缺少隔离器意味着没有加力时仍然有一定的接触

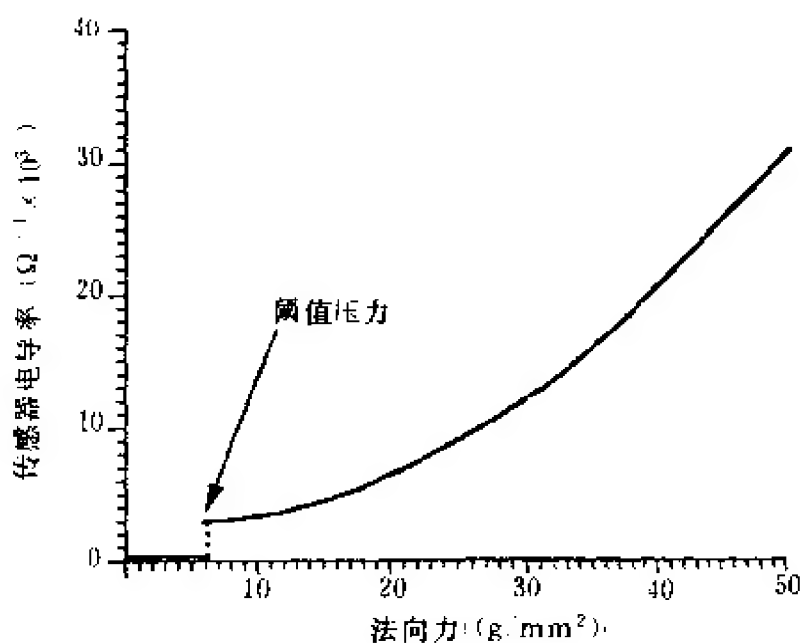


图 4.5 用导电橡胶和隔离器网构成的传感器  
法向力跟接触电阻的曲线

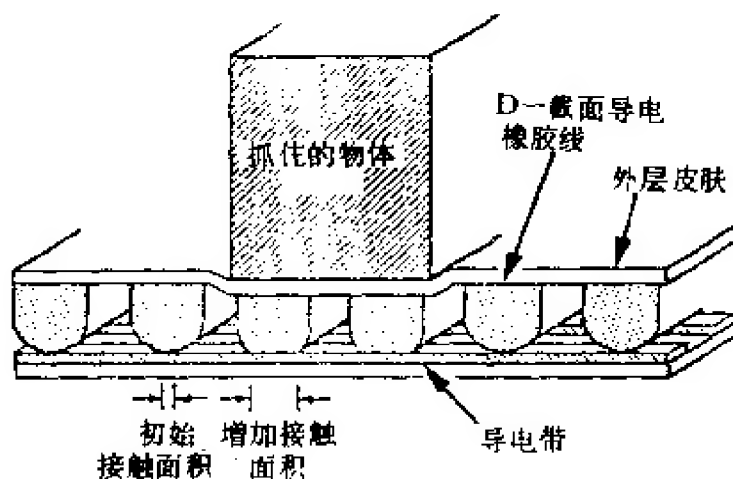


图 4.6 采用 D-截面导电橡胶线的压阻器

电阻。

几种导电橡胶受压时其体电阻发生大变化。例如, Dynacon 工业制作大量压力敏感硅橡胶材料, 这种材料含有分散金属颗粒。1978 年 Snyder 等人用这些材料制成  $4 \times 4$  传感器阵列。他们发现虽然 Dynacon 材料使用简便, 可制作合适的触觉传感器, 但材料疲劳容易导致传感器失效。

硅基导电合成橡胶有化学惰性和宽的工作温度范围。这种材料可浇铸成指尖形状的复合曲线,能给出良好的抓爪表面。以导电合成橡胶为基础设计的大多数传感器的电输出信号强,频率响应范围从直流到 10~100Hz。这种材料的缺点:

- (1) 蠕变—— 恒定负载下传感器会输出变化;
- (2) 存储—— 合成橡胶除去负载后需要较长时间才能恢复原始形状;
- (3) 滞后;
- (4) 性能随温度而变。

通过恰当的配置,导电合成橡胶可减少以上缺点,从而获得好的触觉传感器材料。

#### 4.3.2 碳毡和碳纤维

1981 年 Larcombe 将碳毡和碳纤维夹入金属电极间,从而构成压阻传感器。图 4.7 示出碳毡传感器的原理图。

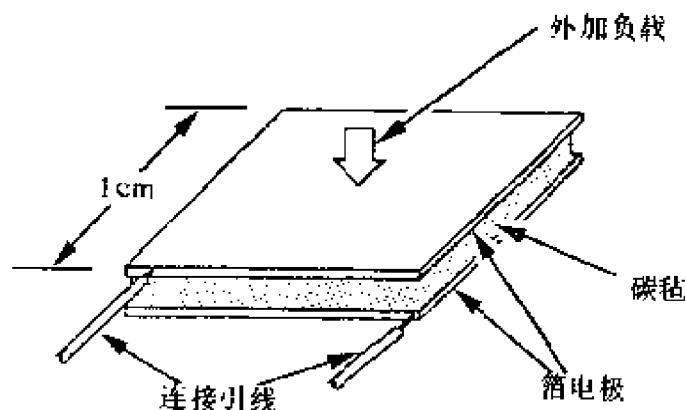


图 4.7 碳毡触觉传感器

图 4.8 示出传感器对增加负载的响应。在 10g 以下传感器的电噪声相当大。该噪声跟碳精微音器产生的杂音和劈啪声类似。负载增加时碳纤维压紧在一起,从而导致更多的电接触和毡电阻减少,电噪声

也随之减少。负载超过 5kg 时,接触纤维间的接触面积开始增加,并导致电阻的进一步减少。

碳纤维和碳毡传感器都很坚固,可形成跟指尖一致的形状。它们可用于很高的温度(仅受碳氧化的限制)和相当大的过载,和导电合成橡胶相比其滞后低。在低负载下传感器噪声是一个问题,

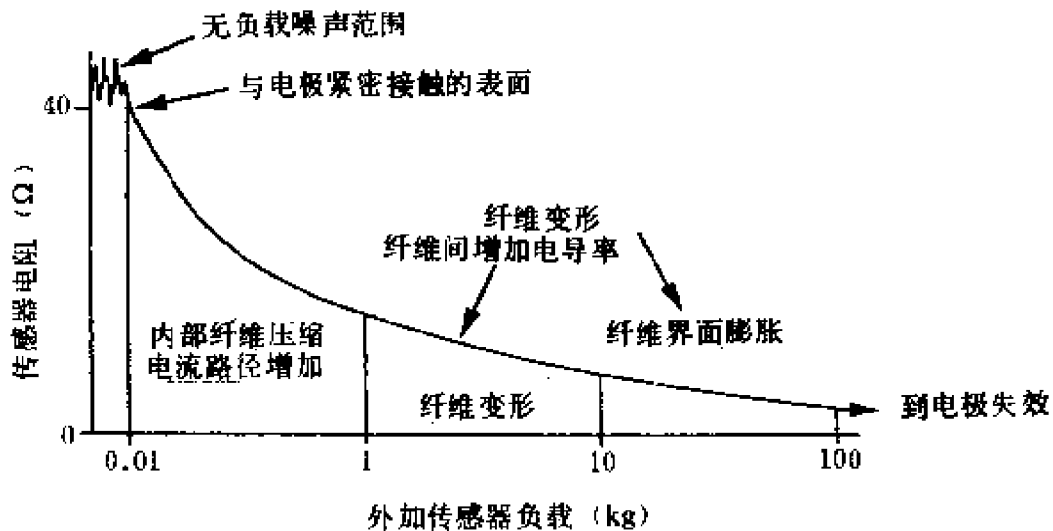


图 4.8 碳毡触觉传感器负载与电阻的关系

这对制作密集传感器阵列的小型传感器是个难点。这类传感器适合检测机器人大面积接触。

### 4.3.3 半导体应变计

金属和半导体的压阻元件都已用于构成触觉传感器阵列。用得最多的是金属箔应变计，特别是它们跟形变元件粘在一起可将外力变换成应变，从而进行测量的应变计用得更多。利用半导体技术可在硅等半导体上制作应变元件，甚至信号调节电路亦可制作在同一块硅片上。

硅触觉传感器有线性度好，滞后和蠕变小，以及可将多路调制、线性化和温度补偿电路制作在硅片内等优点。缺点是传感器虽然设置过载保护，但仍有过载发生。另外硅集成电路的平面性导致难于实现指尖形状传感器的性能。硅集成电路的材料成本很低，每平方毫米仅几美分，因此硅集成电路的价格主要取决于市场销售量，目前硅集成传感器的市场销售量很低，故产品价格昂贵，每只价格达几十到几百美元。

## 4.4 压电聚合物

早在 1880 年, P. 居里和 J. 居里兄弟就发现, 在某些晶体的特定方向上施加压力或拉力, 则晶体的一些对应的表面上分别出现正或负束缚电荷, 其电荷密度跟施力大小成比例。这种现象称为“压电效应”<sup>[5]</sup>。压电效应仅在无中心对称的晶体中发生, 故在三十二种点群的晶体中, 仅二十种非中心对称点群的晶体才可能有压电效应。例如, 若对石英晶体施加  $1\text{N}/\text{m}^2$  的应力, 则产生约  $2\text{pC}/\text{m}^2$  的极化强度。无机压电材料可用于制作多种传感器<sup>[6]</sup>, 但由于材料有脆性, 故不是制作触觉、滑觉等机器人用传感器的好材料。1969 年发现聚偏二氟乙烯(PVF<sub>2</sub>)等聚合物有良好的压电性<sup>[6]</sup>, 特别是它的柔性好, 故可说是理想的触觉传感器材料。

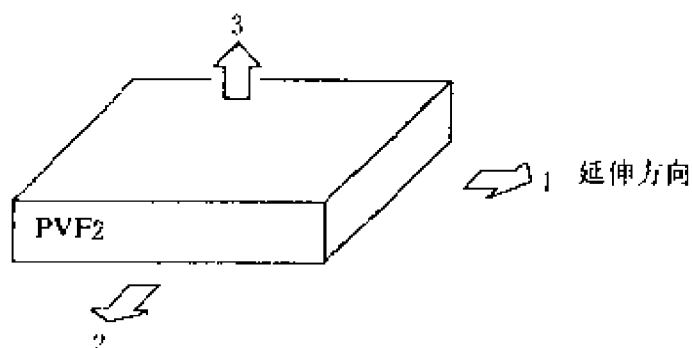


图 4.9 PVF<sub>2</sub> 薄膜的轴向

PVF<sub>2</sub> 压电薄膜如图 4.9 所示。首先将 PVF<sub>2</sub> 挤压成要求的厚度, 然后控制延伸方向使薄膜平面中的聚合物链取向。若薄膜仅在单一方向延伸, 称该方向为“1”方向, 其他两个垂直轴则称“2”和“3”方向。

在高温下进行热处理, 从而增强膜的压电性。然后使 PVF<sub>2</sub> 膜的上下两面金属化, 以便电连接。最后在高温下加约  $600\text{kV}/\text{cm}$  的电场进行极化, 使膜中的分子取向, 从而得到要求的压电性能。PVF<sub>2</sub> 聚合物在电气上的作用象电容器一样, 对膜施加压力时, 材料表面出现跟压力成比例的电荷。压电常数  $d_{33}$  跟在膜“b”

方向施加的压力和材料“a”面上出现的电荷有关。因为上下两面已金属化，故产生的电荷在“3”方向。

$$d_{33} = \frac{\text{电荷 / 面积}}{\text{力 / 面积}} (C/N) \quad (4.4)$$

$d$  的典型值

$$d_{31} = 23 \times 10^{-12} C/N;$$

$$d_{32} = 3 \times 10^{-12} C/N;$$

$$d_{33} = 32 \times 10^{-12} C/N。$$

如图 4.10(b)所示，若 PVF<sub>2</sub> 传感器的输出馈入一个高阻抗缓冲放大器，则由放大器观察到的输入电压  $V_m$  决定于传感器、导线和放大器的总输入电容  $C$ ，以及施加力产生的电荷  $q$ ，即

$$q = C \cdot V_m \quad (4.5)$$

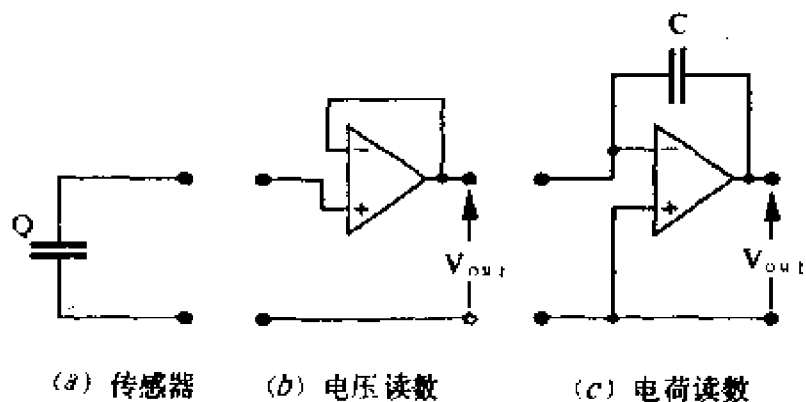
式中  $q$  是施加力产生的电荷(库仑)； $C$  是传感器和其他并联负载的点电容(法拉)； $V_m$  是放大器输入电压(伏特)。因此，通过导线和放大器输入电容的附加并联电容可降低缓冲器输出电压。PVF<sub>2</sub> 聚合物、绝缘导线和缓冲放大器输入呈现一个很大的有限并联漏电阻，从而漏掉电荷。因此，稳态力的输出电压会衰减到零，这样，PVF<sub>2</sub> 传感器仅能检测力的变化。

电荷放大器能降低传感器两端的杂散电容和漏电阻。图 4.10(c)示出传感器电荷转移到电容器  $C$  的原理图。电荷  $q$  一定时，输出电压  $V_{out}$  决定于电容  $C$ ，即

$$V_{out} = - \frac{q}{C} \quad (4.6)$$

由于放大器的内部漂移，有时需要重调电路，以阻止漂移造成的误差。另一种方法是在  $C$  的两端连接一个电阻器，以阻止放大器漂移导致电荷积累。

1987 年 Dario 等用 PVF<sub>2</sub> 膜研制成类皮肤传感器。这种传感器包含两层力敏感层，有触觉功能，这里论述其力敏性能。图 4.11 示出该传感器的结构，它含有一层深敏感层(“皮肤”传感



(a)传感器; (b)读出电压; (c)读出电荷

图 4.10 PVF<sub>2</sub> 传感器电荷输出的读出方法

器)、一层较厚的中间柔性层和表面的薄敏感层(“外表皮”传感器。皮肤传感器由相隔 5mm 的  $5 \times 7$  个敏感元件阵列组成, PVF<sub>2</sub> 膜粘到电极图形上, 这一层敏感正向力。外表皮层传感器含有按照六角形(六个排列成圆, 一个在中心)每隔 5mm 排列的七个元件, 这些元件对形变和温度变化极灵敏。

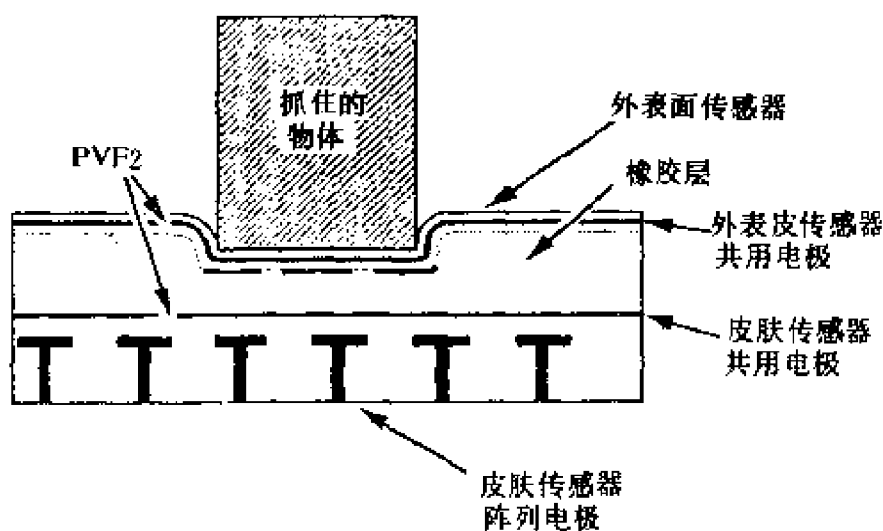


图 4.11 PVF<sub>2</sub> 为基的触觉感觉皮肤

PVF<sub>2</sub> 聚合物薄而柔软, 故可构成任意形状。PVF<sub>2</sub> 敏感负载的频带宽和线性度好, 但其响应频带不能扩展到直流, 故不能直接检测负载。PVF<sub>2</sub> 材料能产生一个电荷输出, 但该电荷易受电干



扰,并难于构成大的传感阵列。PVF<sub>2</sub>还会敏感热量,超过 100℃会失掉压电性。但在较低温下 PVF<sub>2</sub> 有热释电性,即会输出电压,可利用热释电性敏感温度。若 PVF<sub>2</sub> 同时受负载和温度作用,则难于将二者的影响分开。在机器人传感器领域,压电聚合物有潜在应用,它是检测冲击和振动的良好传感器材料。

## 4.5 光 学

### 4.5.1 破坏内反射

一块清澈塑料可用作光波导。在边缘引入的光通过全内反射可在塑料片的两边传播,并在相反一边射出。决定两种介质界面反射光量的性能称折射率。折射率  $n$  是真空中光速  $c$  和介质中光速  $v$  的比。

$$n = c/v \quad (4.7)$$

空气的折射率约为 1,而有机玻璃(聚甲基丙烯酸甲酯)的折

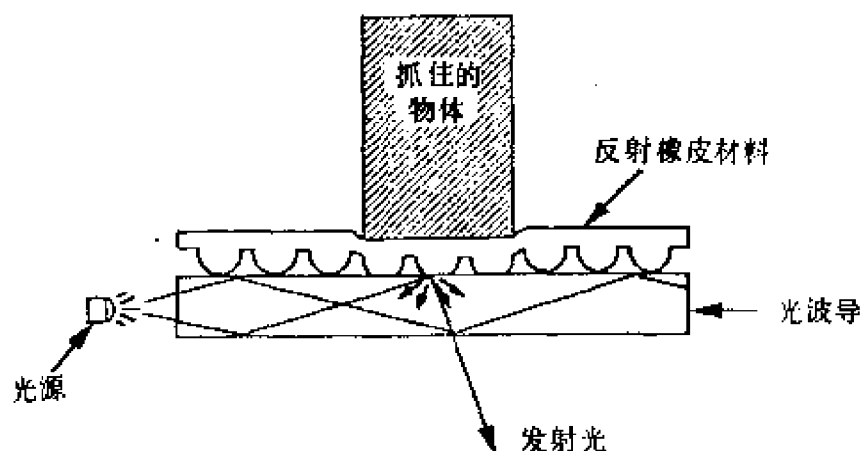


图 4.11 一破体内以反射橡胶层为感测器

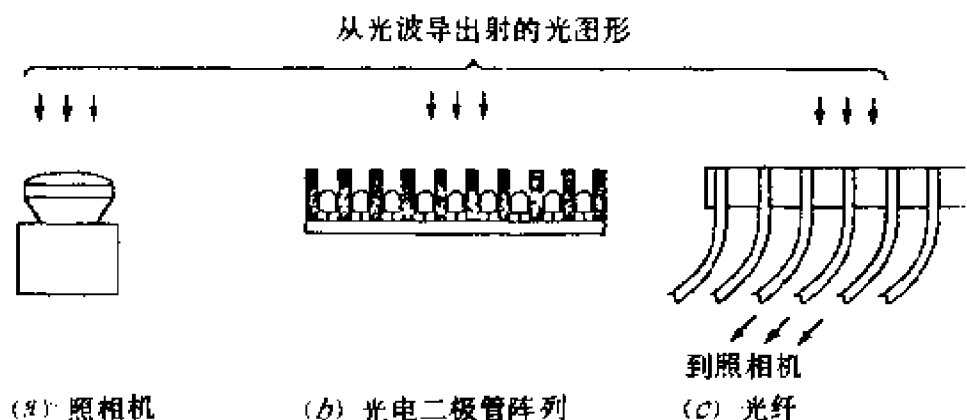


图 4.12 检测出射光的方法

具有扁平表面的反射橡皮薄片可给出高分辨率的二进制(接触或无接触)图像。若橡皮薄片跟织物表面铸在一起,则可获得跟接触面积和外力成比例的输出。

这类光学触觉传感器同样可用反射橡皮材料制成敏感剪切力的传感器。剪切力通过橡皮薄层材料内部埋置的特别结构用图像显示出来。图 4.14 和图 4.15 示出两种实例。

微细杠杆受外力时橡皮元件变形。若有剪切力传递到微细杠杆,则杠杆被推进,从而使图形橡皮元件跟光波导形成不同的接触,如图 4.14 所示<sup>[1]</sup>。

传感器中设置一个弹性球体,在剪切力作用下弹性球体离开无负载中心位置。正向力和剪切力对球的作用如图 4.15 所示。在

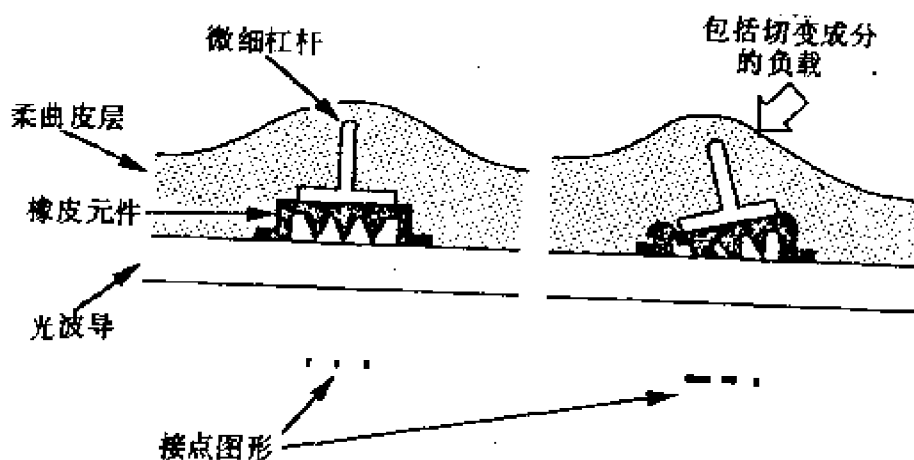


图 4.14 用微细杠杆检测剪切力

这两种情况下，可分析图形橡胶元件形变产生的光学图形和弹性球体，从而检测出正向力和剪切力的总量。

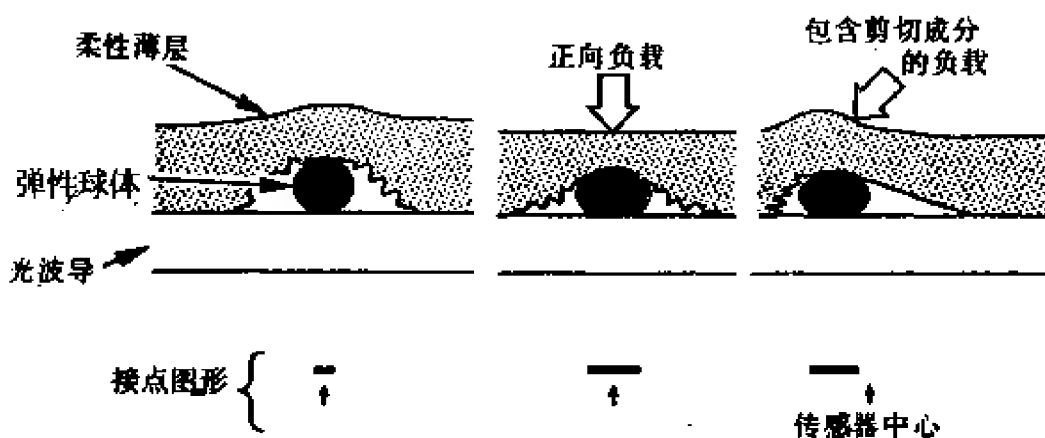


图 4.15 用弹性球体检测剪切力

根据破坏内反射的传感器可制作指尖形状的高分辨率触觉图像，故可设计出高分辨率触觉传感器。因为它们调制光，故隔断外部光时，其传感器机理可不受电磁干扰的影响。这些触觉传感器用透镜将图像汇集到电荷耦合器件(CCD)或动态随机存取存储器(DRAM)中。光学传感器多半安装在机器人抓爪或手表面上，但其外形过于庞大而不适用。为此用光纤把图像转移到远距离照相机上，但采用这种技术的传感器难以制作。原因是传感器的工作受粘附到光波导上的薄层橡胶影响。

#### 4.5.2 光-机械传感器

Lord 公司是触觉传感器的主要制造厂家，他们的触觉传感器具有蘑菇状突出部分的阵列的橡胶薄层，形成传感器表面。蘑菇的头部连接正向力，其茎充当光阀的作用，从而调制发光二极管和随正向力而变的光电探测器之间的光传输。

图 4.16 示出光-机械传感器的工作原理。跟机器人手指接触的 Lord LTS-210 型阵列力传感器，在 1.8mm 的水平和垂直间隔上含有  $10 \times 16$  个阵列。该传感器能敏感六个轴向的力。

Lord 公司在触觉传感器的结构上花费了巨大精力。每个传感器含有光电发射器和光电探测器，并各自跟电阻器匹配和调谐，从而补偿它们的响应。为了密切匹配，每个传感器的特性记录在检查表上，以便使用软件补偿。因为偏转元件用橡胶制作，故传感器响应受蠕变、滞后、存储和温度变化的影响。采用这种设计可构成指尖形传感器。

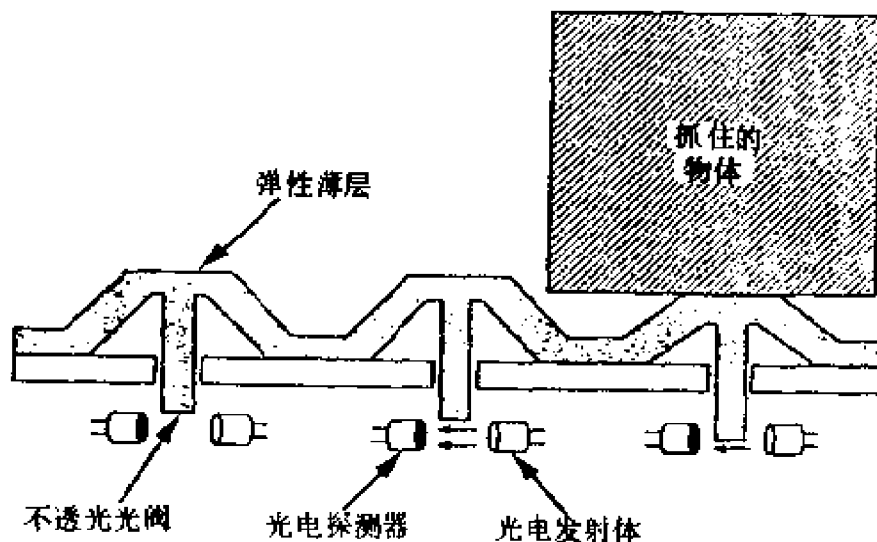


图 4.16 光机械阵列触觉传感器

弹性体和橡胶用作测力计中的形变部件时，其机械性能相当差。1988 年 Maalej 和 Webster 报道一种光机械触觉传感器<sup>[1]</sup>，其

用弹簧钢的 U-形梁作为形变元件。磷青铜和铍铜也可采用(铍是很毒的)。图 4.17 示出金属弹簧光-机械触觉传感器的构形。这种设计有滞后小、重复性和线性度好等优点,缺点是尺寸大( $4\times 6\times 3\text{mm}$ ),从而使其空间分辨率受到限制。

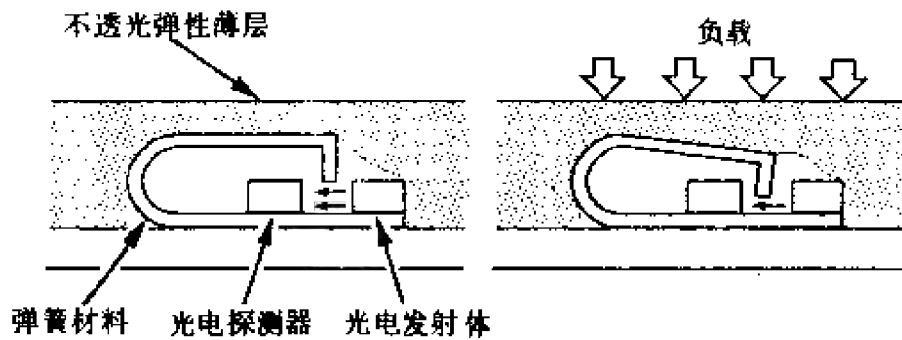


图 4.17 金属弹簧光-机械触觉传感器

### 4.5.3 光纤

光纤用作光导来运载光学编码信息和光能,跟用电线传输电信号和能量一样,十分方便。另外,光纤也能形成换能器机构的一部分,并有转移光能和触觉传感器数据的功能。

#### 4.5.3.1 邻近光纤的光耦合

光沿着光纤传播,传播中辐射造成的损耗很小。若光纤表面粗糙,则在粗糙点光会离开或进入光纤。若两根光纤彼此靠得很近,且两者都有粗糙面,则光可在光纤间通过。邻近光纤间的光耦合是它们的间隔的函数。图 4.18 示出的传感器设计,其用闭合网眼耐湿橡胶制作的 D-截面芯线作形变膜,并通过跨越塑料光纤间的光耦合检测产生的偏转。垂直于传感器表面的负载压缩 D-截面合成橡胶电线使光纤更靠近,从而提高光耦合。

传感器由一组平行输入光纤和一组平行输出光纤构成,输入、输出光纤成直角。为了读出在一个跨接点的光纤间隔,光注入到输入光纤,并测量耦合到相对应的输出光纤的合成光。1987 年 Schoenwald 等报道了间隔为  $1\text{cm}$  的  $4\times 4$  阵列<sup>[1]</sup>。这种设计有寄

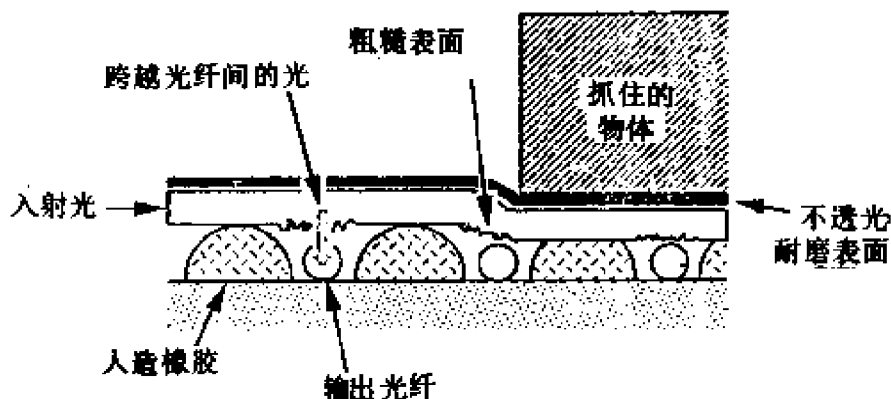


图 4.18 光纤间可变耦合的光纤传感器

生光程，克服寄生光程用的防护装置和虚接地对光不起作用。这种传感器有柔性，故适用于复杂弯曲表面，其还有消除跟光学换能器有联系的噪声的优点，但合成橡胶用作形变膜有缺陷。

#### 4.5.3.2 光纤的弯曲损耗

光通过芯包层界面的反复内反射传播。如前述，为了产生全内反射，光必须在大于临界角  $\theta_c$  的角度下入射到界面上。若光纤严重弯曲，则离开芯的光，入射角显著减少，图 4.19 示出这种效应。在这种微弯曲条件下光纤传播光的量大大地减少。这种效应已用于微弯曲触觉传感器，图 4.20 示出这种传感器的原理图。

微弯曲传感器中单色激光源聚集在光纤末端。一些激光经包层传播，但必须除去这种光，以免它妨碍测量。为了消除这种光，光纤绕在一个剥离的柱子上，光纤中产生的弯曲导致光离开光纤经包层传播。光纤夹紧在 V 形槽和棒中间，加力的杆使光纤产生微弯曲，从而使内芯传播的光正比于微弯曲量。一些出射光在包层内传播，保留在内芯的光被 PIN 二极管检测以前必须将另一个剥离柱除去。

1988 年 Winger 等报道了一个实验用  $2 \times 2$  机器人传感器<sup>[1]</sup>。这种传感器在其线性区能检测 5g 负载，其线性范围每个传感器元件在 125 和 225g 之间。问题是包层材料有滞后现象。微弯曲传感器需要二根跟传感器连接的光纤，每个传感器元件需要一个激

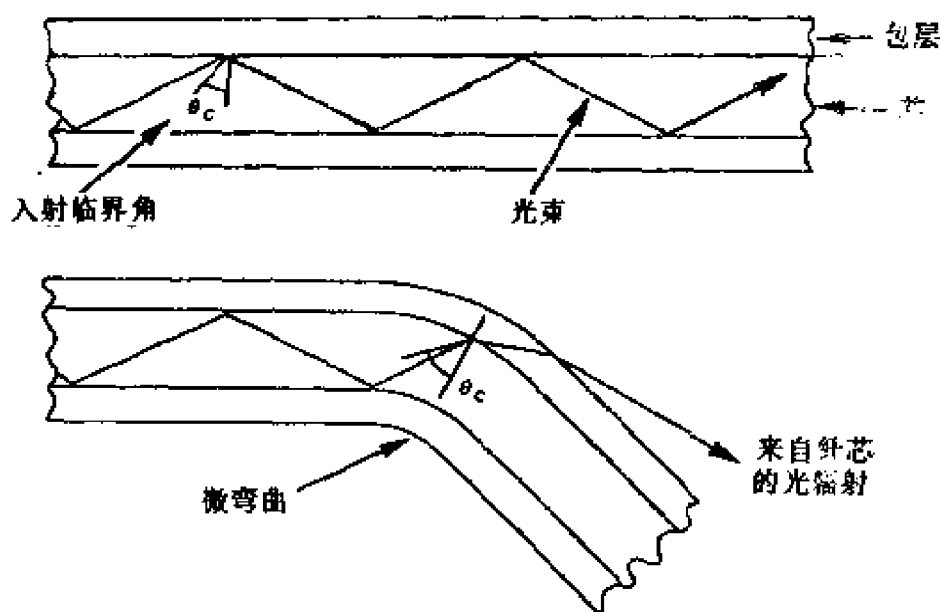


图 4.19 微弯曲造成的光辐射

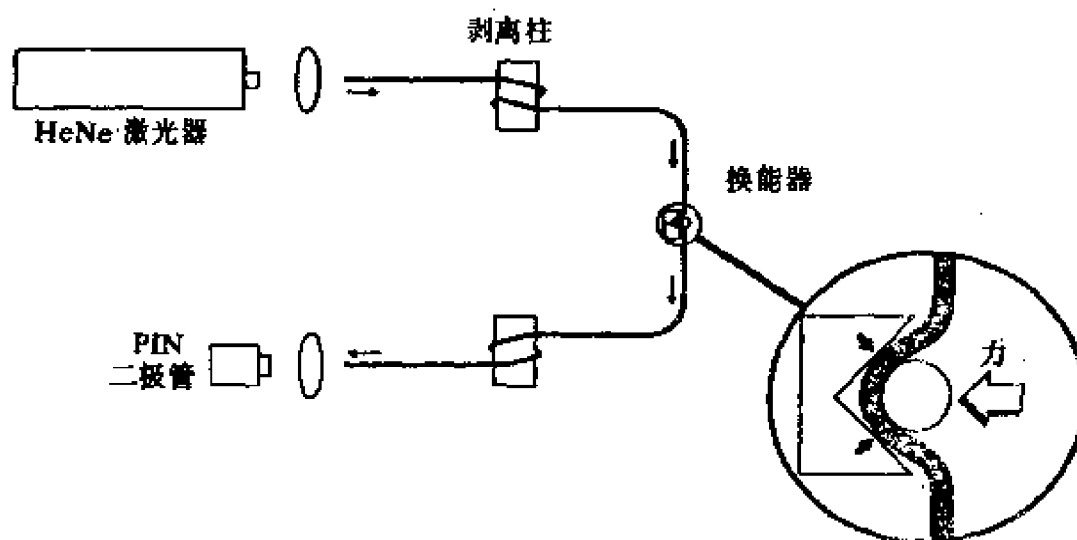


图 4.20 光纤微弯曲传感器

光器和一个 PIN 接收器。这样会提高大阵列传感器的成本。若能排除这个问题，便可构成一个多弯曲和抗干扰的光纤传感器。

#### 4.5.3.3 光学薄层厚度传感器

这种传感器用于测定透明的合成橡胶层的厚度，它是靠测量橡胶层远的一边背后反射光强来实现。图 4.21 示出这种传感器的截面图。

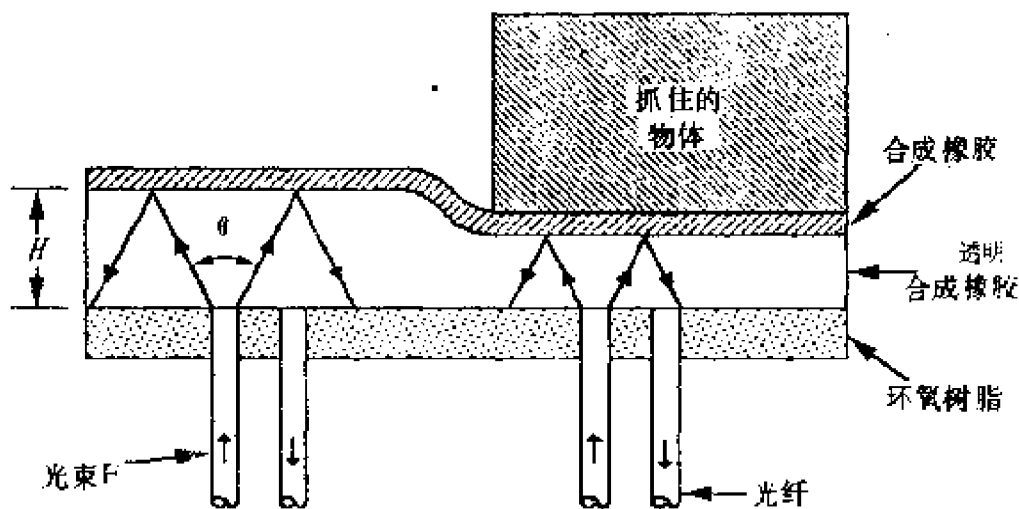


图 4.21 建立在形变弹性反射表面和光纤光学技术基础上的触觉传感器

光通过光纤引入传感器。一束加宽成锥体的光经透明合成橡胶层传播出去，并被白色合成橡胶的外部薄层反射。反射光被第二根光纤和从传感器阵列位置来的这些光纤的一束接收。反射光是通过测量反射光的计算机视觉系统观察到的(见图 4.22)。外力压缩透明合成橡胶时，这将缩短光锥体传播的距离，并限制光色散，从而减少了被接收光纤积聚的光。一种改进的传感器模型如图 4.23 所示。使用单根光纤来传输和接收光，并用一个半镀银反射镜(分束器)把反射光分离开。

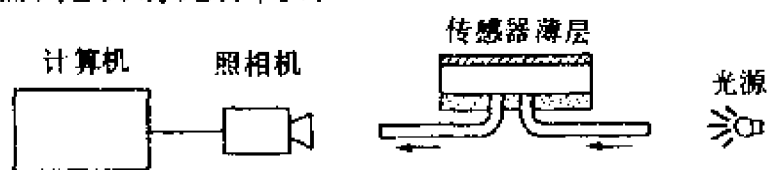


图 4.22 每个传感器元件使用二根光纤的执行过程

Schneider 等叙述的传感器每  $6.45\text{cm}^2$  含有 2100 个敏感点和显示仅有 18:1 的动态范围。在制作过程中用手把每个光纤定位，这是一种很费力的劳动。清澈橡胶材料用来发现仅有几百次循环操作后产生的失效。所以，必须改进制作技术和传感器的坚固性，以便制成这种可行的传感器。



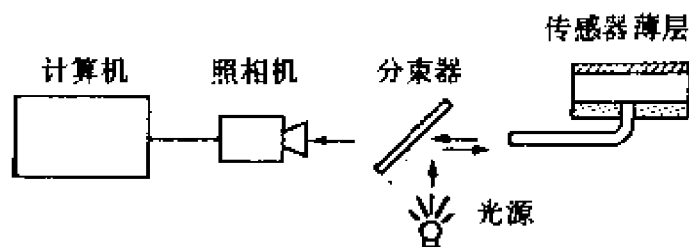


图 4.23 每个传感器元件使用一根光纤的执行过程

#### 4.5.4 弹性光

弹性光可用于测量旋光材料中的应力。图 4.24 示出用弹性光测量应力的实验装置。

(1) 光源辐射的光含有不同偏振和振幅的波。偏振和振幅都随时间而变化(光在其传播方向呈横波运动,偏振表示该波的振动方向)。

(2) 偏振器 1 只允许一种有特定偏振面成分的波通过,而阻止与其成直角成分的波通过。

(3) 光进入双折射材料时,光被分裂为成直角偏振的 p 和 q 两种成分。这种成分跟双折射材料中的主应力排列一致(主应力是材料中最大和最小的应力面)。

(4) 如果两种具有同样相关相位的波从双折射材料中出射,它们再进入双折射材料时即恢复其原光的波形。

(5) 偏振器 2 相对于偏振器 1 旋转  $90^\circ$ ,因而阻止重建波的传输。如果两种波不能表现出相同相关相位,它们进入双折射材料时便产生椭圆偏振波。这种椭圆偏振波的一部分经偏振器 2 通过。暗区或干涉条纹处光不经该系统传播,这是两种效应产生的结果:

a. 等倾线。从偏振器 1 出射光的区域跟主应力轴之一成一直线。在这种情况下光不分裂成两种成分,故不改变出射。这种效应提供有关双折射材料中主应力取向的信息。

b. 等色。若光被双折射材料分裂,但光进入和出射的相位相

同，则产生等色。如果材料中的主应力相同，或者由于产生整数相位旋转而不同，则说明是正确的。等色可用数学公式表达：

$$r = n \cdot \lambda \quad (4.9)$$

式中  $n$  是整数， $\lambda$  是光波长， $r$  是相对光程差。

根据主应力，相对光程差由下式给出：

$$r = C(P - Q)d \quad (4.10)$$

式中， $C$  是应力-光学系数（一种材料常数）， $P$  是  $p$  方向的应力分量， $Q$  是  $q$  方向的应力分量， $d$  是材料厚度。式(4.10)可用于计算双折射材料中一点的主应力。进行这种计算必须排除等倾条纹的影响和确定通过特定点的条纹数  $n$ 。

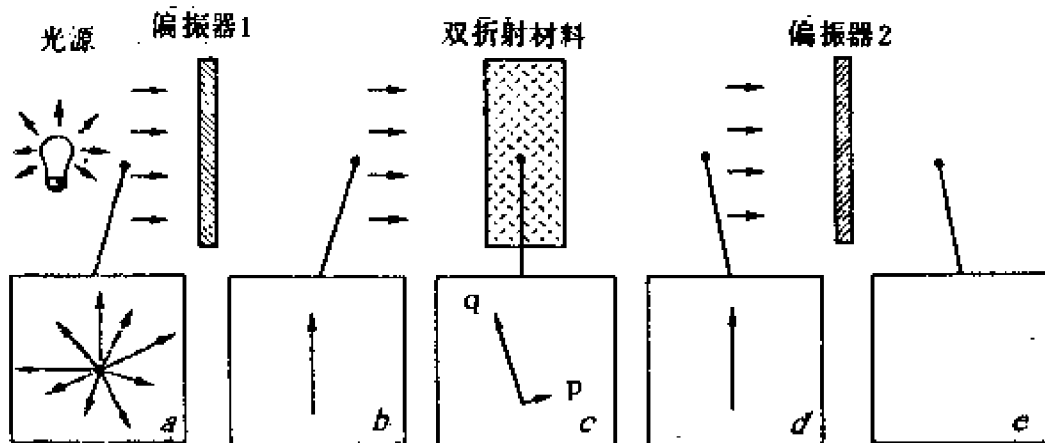


图 4.24 用弹性光测量应力

弹性光触觉传感器测量传感器和外部物体之间力的图形，这种测量是将一层弹光材料引起的合成应力形成图像。Cameron 等提出了一种测量加到双折射材料片上的力的传感器，如图 4.25 所示，双折射材料片用圆偏振光照亮，以便观察等色条纹。CCD 照相机记录合成应力图形。分析照相机图像可确定双折射塑料内部的应力分布。Eghtedariand 等提出一种用作测量滑动的类似传感器，其应用平面偏振，故可将等色和等倾条纹形成图像。这种传感器只能寻找指示被抓物体滑动的图像变化，故不能用它分析极复杂的条纹图形。

上述效应的传感器用于弹光测量，其给出的线性度、滞后、蠕

变和存储均较真实。这种传感器的光学系统有庞大的体积，故难于使它容纳在机器人手或抓爪内部，使其形成指尖形状的技术极复杂。为了避免双折射薄片擦痕和碰撞传感器应设置保护装置。

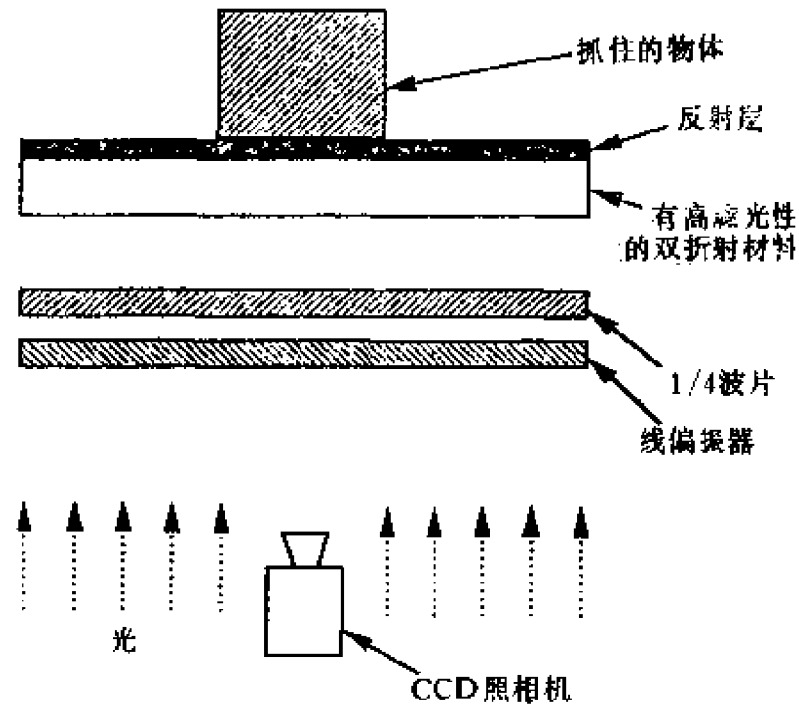


图 4.25 弹光传感器

## 4.6 磁

### 4.6.1 霍尔效应和磁阻

霍尔效应跟磁场中力作用于载流导体时观察到的电机效应密切相关(电机中电流方向和磁场方向互成直角)。电机力直接作用于电荷粒子(在金属导线中为电子)，从而使电流和力转移到载流导体上。图 4.26 中若电流  $J_z$  在  $z$  方向流过导体，而在  $y$  方向加磁感应强度  $B_y$ 。于是，载流子在  $x$  方向受力的作用，则电荷流向样品的底表面，从而产生霍尔电位  $E_H$ 。

流经样品的电流

$$J_z = N \cdot q \cdot V_d \quad (4.11)$$

式中  $N$  是每单位体积内载流子的数量,  $q$  是每个载流子上的电荷(库仑),  $V_d$  是平均载流子漂移速度(m/s)。载流子的速度取决于外加电场和载流子迁移率

$$V_d = m \cdot E_z \quad (4.12)$$

式中  $m$  是载流子迁移率,  $E_z$  是  $z$  方向的电场(V/m)。作用于电场和磁场中运动电荷的力

$$F = q(E_{+v} \times B) \quad (4.13)$$

式中  $\times$  是矢积。稳态下运动电荷和磁场互作用产生的力跟霍尔电压电场引起的载流子上的力相平衡, 使平均速度移动的电荷粒子通过而不偏转。这种力平衡由下式表达:

$$q \cdot E_H = -q \cdot m \cdot E_z \times B_y \quad (4.14)$$

因此

$$E_H = -m \cdot E_z \cdot B_y \cdot i_x \quad (4.15)$$

式中  $i_x$  是  $x$  方向的单位矢量。式(4.15)可写成

$$E_H = J_z \cdot B_y \cdot R \quad (4.16)$$

上式表示霍尔电压跟流过传感器的电流  $J_z$  和外加磁场  $B_y$  成正比。霍尔系数

$$R = -\frac{1}{N \cdot q} = -\frac{m}{s} \quad (4.17)$$

式中电导率

$$s = N \cdot q \cdot m \quad (4.18)$$

由上式可知,  $R$  跟载流子浓度成反比, 这就是半导体材料有霍尔效应的原因。

平均速度移动的载流子通过霍尔传感器而不偏转。然而, 载流子有一定速度范围, 超过平均速度的载流子会偏转, 其路程超过传感器的传播长度。偏转粒子的迁移率低, 故使电阻器增加电阻。电荷粒子偏转导致传感器电阻受外磁场影响, 这就是磁阻效应。

对于一个特殊结构的电极, 霍尔效应传感器仅在一个方向敏

感磁场(图 4.26 的  $y$  方向)。相反,磁阻效应可用于检测一个平面内任何方向的磁场(图 4.26 的  $x$ - $y$  面)。

霍尔效应和磁阻效应都可用于检测磁场强度。对于设计触觉传感器,磁阻效应有

简易性(磁阻传感器仅要二个连接,而不是霍尔传感器的四个连接)和敏感方向的优点(磁阻传感器可检测垂直于电流方向平面内的磁场,而霍尔传感器仅检测垂直于电流方向的磁场,以及检测霍尔电压的电极取向)。

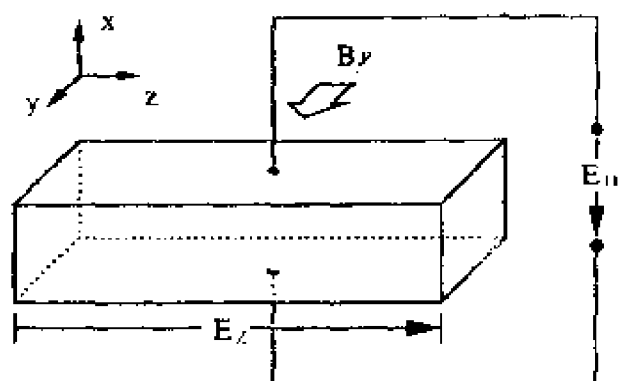


图 4.26 霍尔效应电压

#### 4.6.1.1 敏感转矩的触觉阵列

这种传感器的硅橡胶中设置含磁偶极子的阵列,如图 4.27

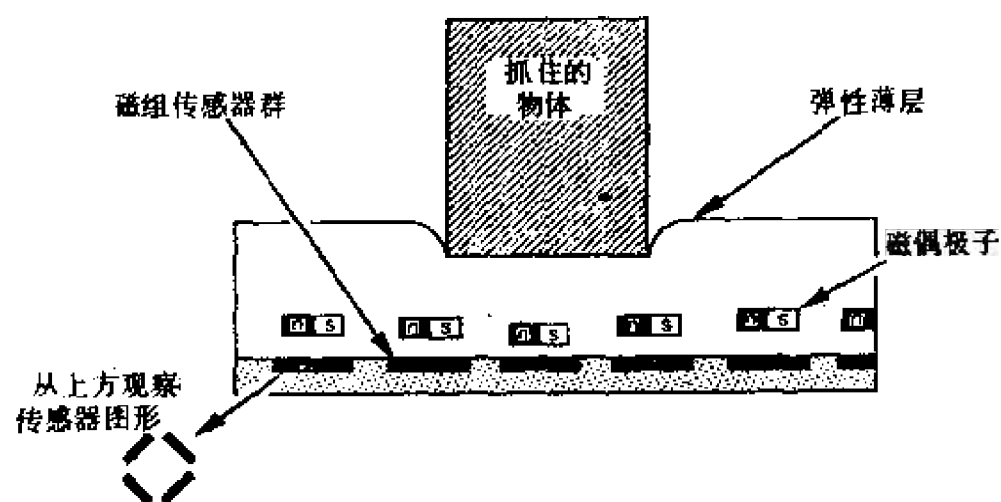


图 4.27 用磁偶极子的磁阻传感器

所示。每个偶极子下方设置四个坡莫合金磁阻传感器在基片上。坡莫合金是一种含 19%铁和 81%镍的合金,其有很强的磁阻效应。磁阻传感器的磁场用于检测磁偶极子的位置和方向。正向力、切向力和转矩均通过橡皮传送,由每个磁偶极子的高度和方向变化来

检测。

已设计了一种相隔 1.6mm 有两个元件的传感器,其工作特性好,几乎无滞后现象,但需要磁屏蔽,以免磁阻传感器受外磁场影响。这种传感器用硅橡胶作形变元件,故橡胶特性对传感器的蠕变、线性度和温度性能有影响。

#### 4.6.1.2 磁阻薄层

图 4.28 示出的磁阻传感器,载流导线产生磁场。用载流导线选择敏感元件的列,串联连接磁阻元件产生行,从而组成列和行寻址。这种传感器,其间隔为 2.5mm 是可行的。磁屏蔽对这种传感器十分重要,传感器性能很大程度上取决于形变橡胶材料的特性。

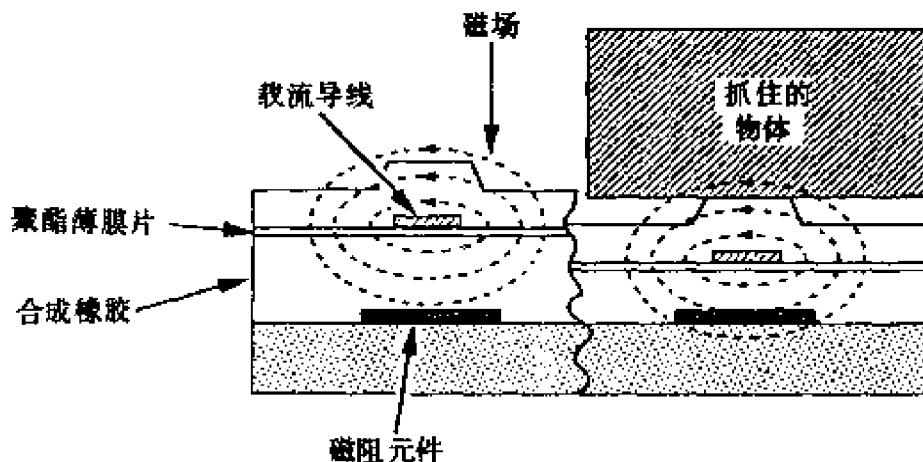


图 4.28 用载流导线的磁阻传感器

#### 4.6.2 磁弹敏感元件

磁弹敏感元件用磁致伸缩材料制作,其工作原理如图 4.29 所示,它有互成直角的两个绕组。无应力时磁致伸缩材料各向同性(在所有方向磁导率相等),故两个绕组间无磁通量耦合,无输出电压。传感器受力时,磁致伸缩材料的磁导率在垂直方向减少而在水平方向增加。用这种方式改变磁场,使磁通量环绕次级绕组,从而产生输出电压。这种传感器有结构可靠、灵敏度高、滞后小和温度系数小等优点。这种传感器在  $\Phi 2.5\text{mm}$  的圆内有  $16 \times 16$  个磁

弹敏感元件。

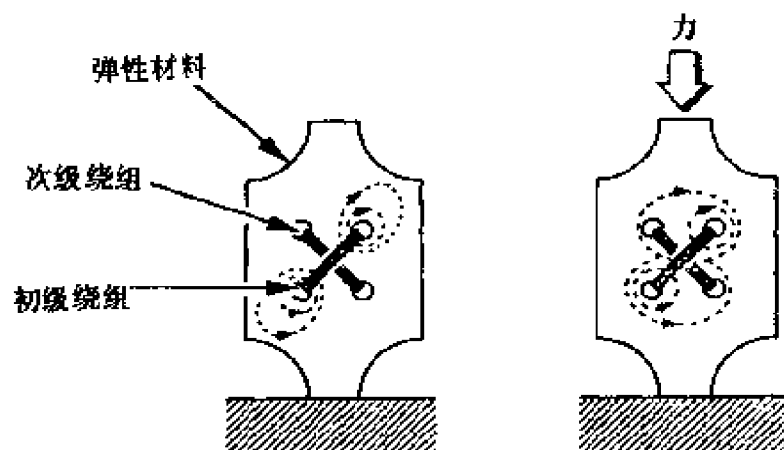


图 4.29 外力改变磁通量分布示意图

传感器阵列用一块合成橡胶覆盖，以便保护抓爪表面。对传感器的基本要求是灵敏度高、线性度好和滞后小。传感器及其相关的电路相当复杂。故降低传感器尺寸和屏蔽外磁场干扰，这样才能形成有用的触觉传感器。用高磁导率材料屏蔽可得到好的效果。对于触觉传感器，必须用柔性屏蔽层。

## 4.7 超 声

超声测厚仪用于测量漆层、金属片等的厚度为时已久。若已知超声波在材料中的传播速度，便可计算出材料厚度。根据该原理用超声换能器已制作出触觉传感器，它可用于测量柔性合成橡胶层的厚度。如图 4.30 所示，若弹性薄层的厚度为  $H$ ，弹性薄层材料中的声速为  $v_s$ ，那么，超声波脉冲从换能器传播到薄层表面和回程的时间

$$t_f = \frac{2H}{v_s}$$

例如，弹性薄层材料中的声速为  $103\text{m/s}$ ，薄层厚度为  $3\text{mm}$ ，那么延迟时间为  $6\mu\text{s}$ 。

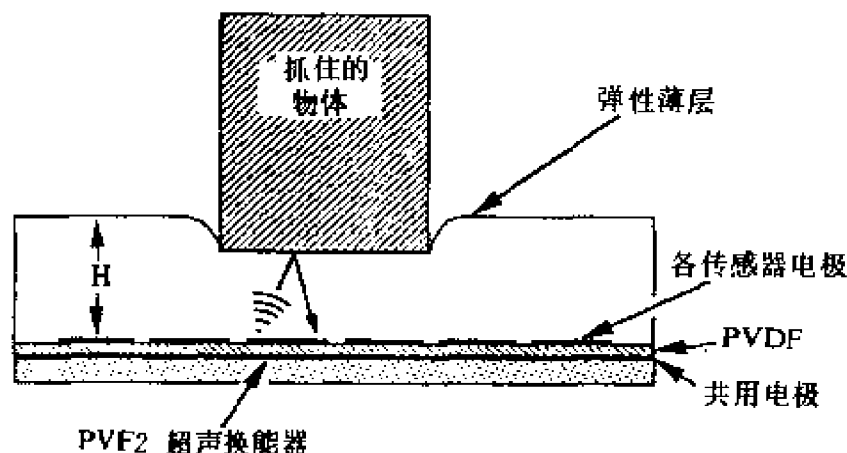


图 4.30 用超声脉冲检测弹性薄层厚度的触觉传感器

物体在柔性层上压出凹痕，则柔性层厚度减小，若检测出许多紧密靠近的间隔点处的  $H$ ，即可得到压痕图像。这种传感器的动态范围为 2000:1，空间分辨率为 0.5mm。

上述传感器可构成指尖形状，但从许多紧密相隔位置点产生和检测超声脉冲的电路相当复杂。若传感器浸在液体中或接触到一种跟薄层材料有类似声阻抗的物体时，超声脉冲由薄层材料表面传播过去而无反射。

## 4.8 电 容

小距离之间的电容可用于检测两个导电板间的间隙。若忽略电容极板的边缘效应，则两极板间的电容

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{s} \quad (4.20)$$

式中， $A$  是电容器极板面积( $\text{m}^2$ )； $C$  是极板间的电容(法拉)； $\epsilon_0$  是自由空间的绝对电容率( $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ )； $\epsilon_r$  是电容极板间介质的相对电容率； $s$  是电容极板间距( $\text{m}$ )。

剪切力能改变两极板之间的重叠面积  $A$ ，正向力能改变极板的间距  $s$ ，故电容可用于检测剪切力和正向力。但是，只有精密的



机械设计才能阻止同一时间内传感器对剪切力和正向力都起作用,这种作用会使传感器难以分离这两种作用。

图 4.31 示出的触觉传感器用注入成型硅橡胶蜂房式材料作为上电极和下电极之间的电介质。外力加到传感器表面时蜂窝状电介质被压缩。外部导电的弹性薄层既起保护电容器作用,又起屏蔽作用。上面的列电极用板固定在聚酯薄膜片上。在弹性介质层的下方将印刷电路材料刻蚀成行电极。多路传输线路图允许待测量的电容在任何行和列电极的交叉点,故可确定那一点的偏转。传感器由间隔 1.9mm 的圆筒的 8×8 传感器阵列构成。指尖式触觉传感器已安装在 Utah-MIT 机器人手上。

电容传感器阵列可形成复合弯曲,获得精确薄层偏转的检测结果。这种传感器的滞后、蠕变、存储、非线性等决定于电容极板间形变弹性材料的性质。

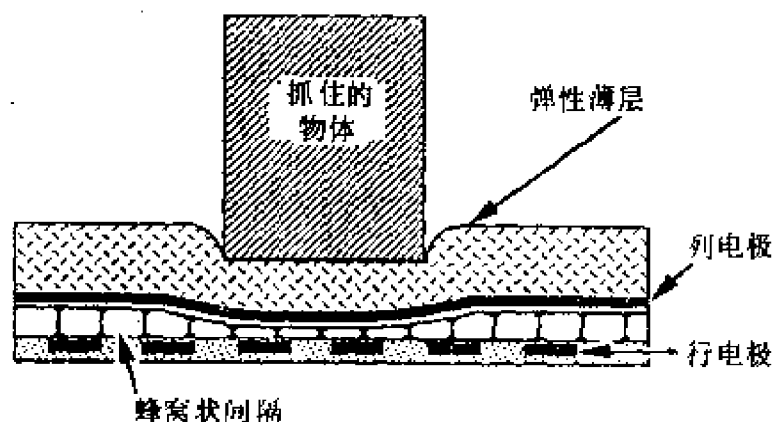


图 4.31 电容式触觉传感器

## 4.9 电化学传感器

根据流动势能现象制作的电化学传感器如图 4.32 所示。用聚丙烯酸和聚乙烯酸制成  $\Phi 1\text{cm}$  和 0.4~0.5mm 厚的离子凝胶圆盘。凝胶体中含有一种平衡可动正电荷的不动负电荷。当对凝胶

体加力时,带正电荷的液体脱离凝胶体,因而形成流动势能。银/氯化银电极接收该势能。这种传感器可检测低频形变,但无稳定态响应。为了缩小传感器外形和提高灵敏度,这种传感器必须改进。

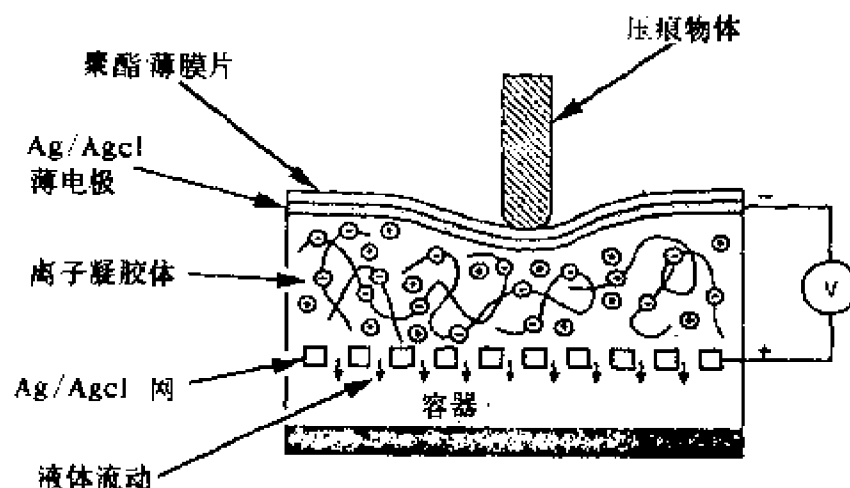


图 4.32 流动势能传感器的原理图

用聚合电解质凝胶体制作的触觉传感器能检测外力。力的作用使凝胶体内不同类型的可动离子迁移,通过离子选择性电极能检测离子浓度。因此,离子浓度可用于确定加给传感器的应力。电化学传感器的凝胶体成分可按配方制作,从而使传感器表面具有类似于人体皮肤的柔顺特性。

## 4.10 典型触觉传感器

典型触觉传感器图像曲线如图 4.33 和 4.34 所示。

本章考虑的大部分传感器都是根据合成橡胶层形变的原理制作,故滞后、蠕变、存储、非线性和温度特性等的传感器性能取决于弹性材料性能。合成橡胶几乎不可压缩,其径向膨胀受周围材料限制。解决的办法是给物体加一个大的力,使物体在合成橡胶层上有压痕,先决条件是接触面积较大。

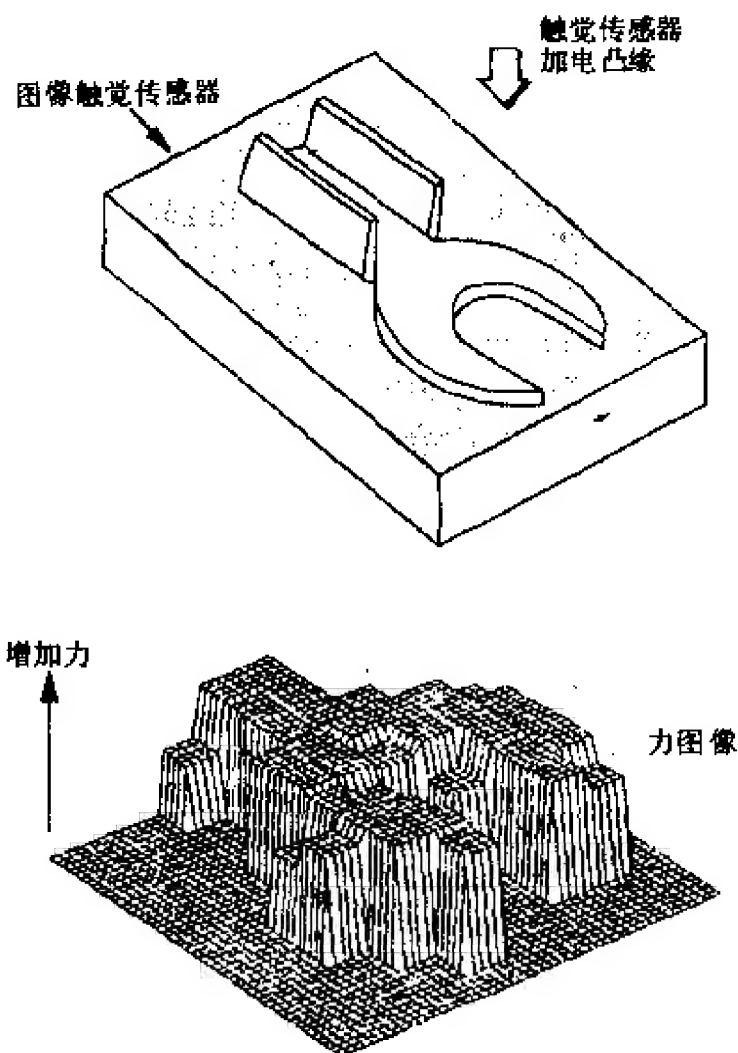


图 4.33 开槽电凸缘加在  $10 \times 10$  阵列触觉传感器上产生力图像的实例

本章考虑的传感器，它们的柔性都不高，主要适合于相对平整的物体。这类传感器可用于检测物体位置和近似曲面法线，不宜用于检测表面弯曲度。下章将考虑一些柔性好的传感器，利用柔性传感器能检测物体表面的形状。

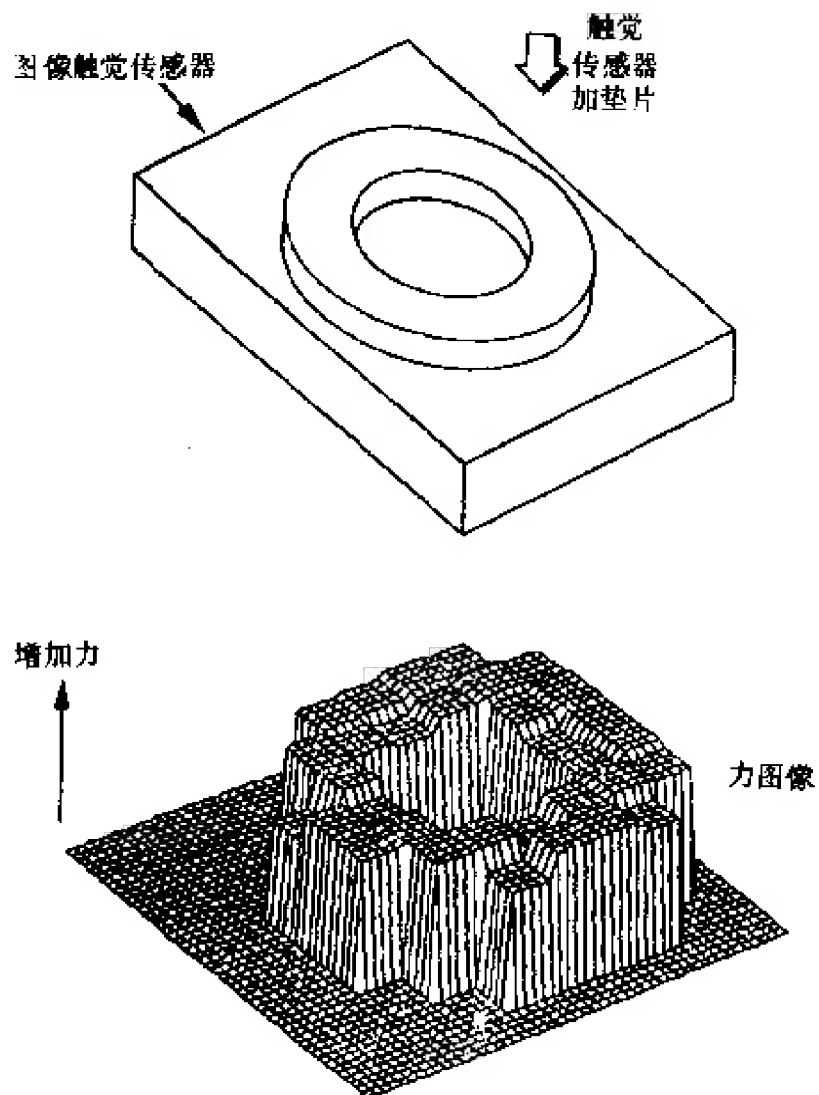


图 4.34 垫片加在  $10 \times 10$  阵列触觉传感器上产生力图像的实例

## 第五章 柔性触觉传感器

通过位置坐标推算法，机器人机械手能准确地抓握非柔性表面的物体。柔性表面使得物体相对于抓爪的位置不精确，但柔性表面能使跟物体轮廓相符合的指尖稳定地抓握，这对未知物体的精确性质或位置，以及试验性的提升特别有用。同时，柔性抓爪表面的缓冲作用还可减小手指表面和被抓物体的磨损。

增加柔性指尖的敏感能力能解决有关物体位置的不准确性，故敏感能克服跟柔性皮肤有联系的问题。另外，柔性还可改进触觉传感器的敏感特性。

### 5.1 柔性对触觉传感器获取信息的影响

根据触觉传感器定义，获取信息必须接触物体。在一定程度上，表面接触面积越大，获得的信息量越大。对于接触面积大的物体，坚实的触觉传感器能获得详细的形状信息。但是，许多部件都只有少量的点或线跟传感器接触，如图 5.1 所示，一个茶匙只有两个分开的接点。

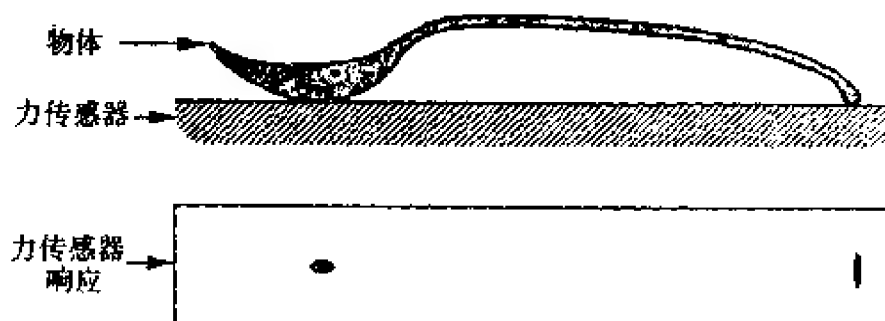


图 5.1 茶匙和坚实触觉传感器间的触点



图 5.2 压入触觉传感器的压痕深度

如图 5.2 所示,研究物体压入传感器的凹痕深度和接触表面的复合面积之间的关系十分重要。

如图 5.3 所示,圆棒半径为  $r$ ,端部有圆锥形、半球形和平直表面形三种,设薄层材料与试棒表面完全吻合。三种棒压痕深度  $x$  和表面接触面积(到最大深度  $r$ )之间有如下关系:

$$a_{\text{圆锥}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot x^2 \quad (5.1)$$

$$a_{\text{半球}} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot x \quad (5.2)$$

$$a_{\text{平直}} = \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot x \quad (5.3)$$

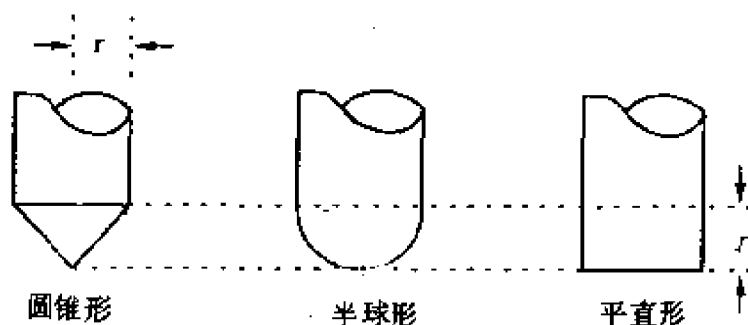


图 5.3 三种试棒的端部形状

图 5.4 示出表面接触面积和压痕深度的关系。由图可知,除很平的物体外,其余两种棒,刚性传感器获取的信息小。物体被压入触觉传感器的压痕越深,获得的表面信息越多。

## 5.2 获取三维表面信息的触觉传感器设计

柔性传感器有获取物体表面形状三维信息的潜在能力,本章介绍高度柔性的、柔性表面大的传感器设计。需要说明的是,刚性柔性传感器之间无明显的界线。

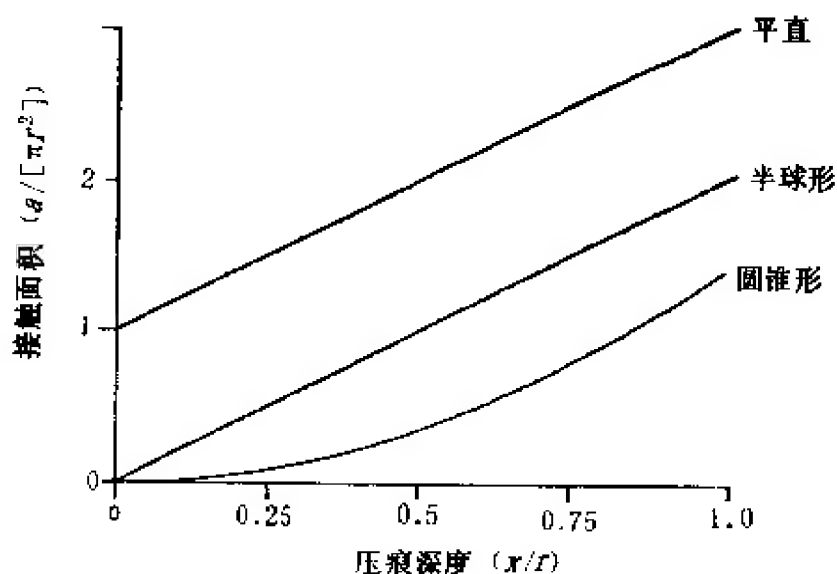


图 5.4 试棒压痕深度跟端部形状的关系

### 5.2.1 柔性薄层触觉传感器

柔性聚氨基甲酸酯泡沫材料可用于设计两种传感器。第一种设计如图 5.5 所示,泡沫材料用硅橡胶薄层覆盖。这种传感器结构

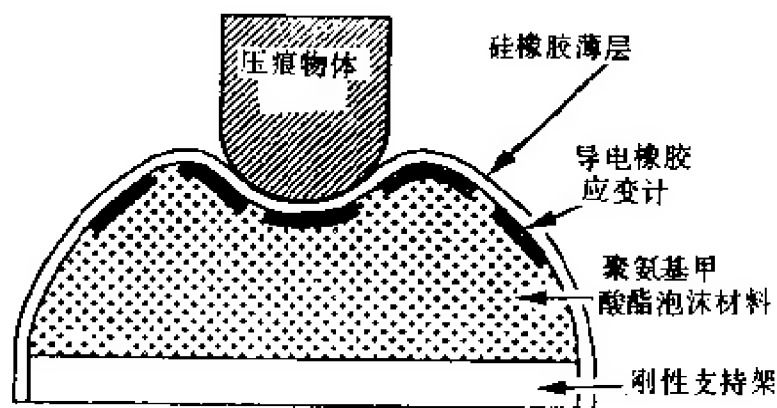


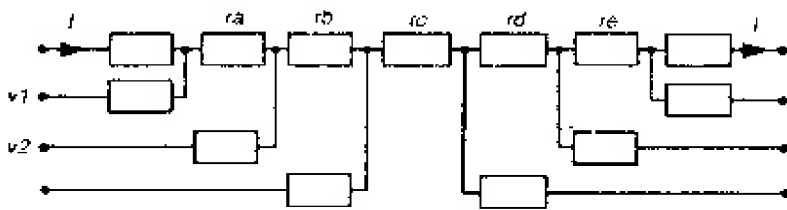
图 5.5 柔性薄层触觉传感器

跟物体周围的轮廓相吻合,并且移去物体时,传感器恢复到最初形状。导电橡胶应变计连到薄层内表面,拉紧或压缩应变计时薄层的形变被记录下来。第二种设计如图 5.6 所示,因聚合物应变计材料只能以薄片形式应用,故将其切割成图中形状,并粘到硬化

硅橡胶薄层下面。这种结构用分压器技术使各个应变元件寻址，传感器高度弯曲和延伸时，避免导致传感器内的电接触。

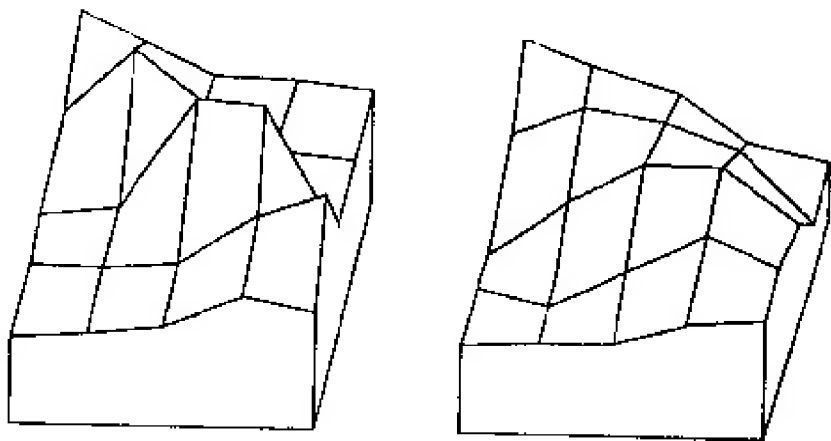


(a) 敏感伸展合成橡胶图形



(b) 合成橡胶材料的等效电阻

图 5.6 用敏感伸展的人造橡胶制作的敏感元件



(a) 刻度尺的尖锐边缘

(b)  $\phi 1\text{cm}$  圆棒

图 5.7  $5\times 5$  柔性薄层传感器(应变垂直上升)获得的数据

$5\times 5$  元件阵列沿分压器的传感器间隔为  $6\text{mm}$ ，邻近分压器之间的间隔为  $10\text{mm}$ 。图 5.7 示出这种传感器获得的数据。从图中曲线可看出，压入传感器的物体的曲率半径有差别。这种传感器记录传感器薄层中的应力。完成传感器的数据变换，即可重建压



痕物体的表面形状。

这种传感器通过分压器寻址,故有大量的互连导线( $5 \times 5$  敏感元件有互连导线 40 根)。若应变片和合成橡胶导线(柔性和低电阻)之间实现可靠连接,便可完成行和列寻址。

### 5.2.2 柔性光-机垫片传感器

如图 5.8 所示,为了得到高度柔性表面,这种传感器也使用聚氨基甲酸泡沫。泡沫垫片的厚度可通过接触泡沫表面的探针测量。泡沫受压时,光敏晶体管被推向发光二极管附近,于是进入晶体管的光量增加,从而给出传感器表面偏转的量度。 $4 \times 9$  元件阵列,元件间隔 7mm。传感器输出和位移呈非线性关系,但可用三级最小二乘法模拟。

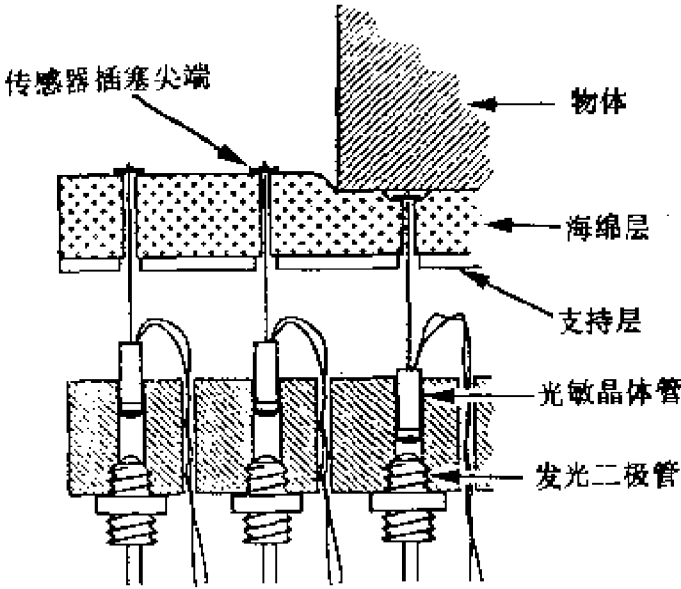


图 5.8 柔性垫片传感器的截面图

因为每个敏感元件极为复杂,故有成本高、体积庞大和难于小型化等缺点。但其基本的设计思想很好,改进设计即可成为实用触觉传感器。

### 5.2.3 平行探针触觉换能器

如图 5.9 所示,这种传感器由探针阵列构成,探针落到物体上,探针的偏转给出探针跟物体接触的每个点附近的三维信息。

探针偏转的电感性敏感如图 5.10 所示<sup>[1]</sup>。机器人将钢探针阵列落到物体上,每个棒触到物体并移动时,电感传感器检测探

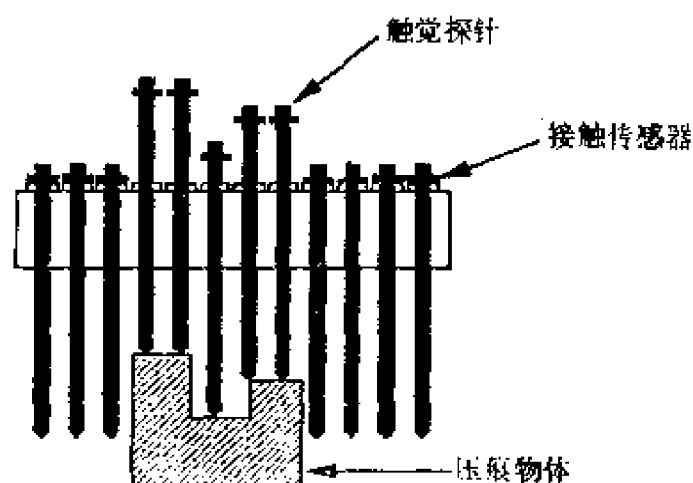
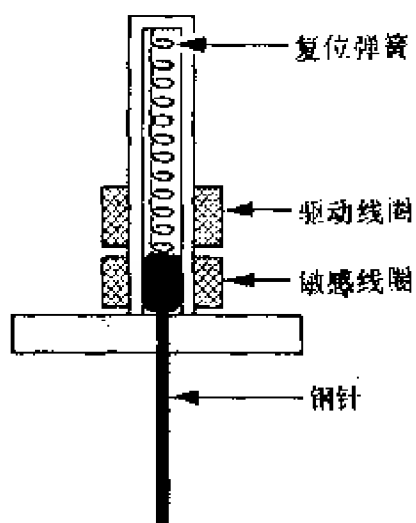


图 5.9 平行探针传感器

针的位移。机器人的移动跟时间有关，在每一时刻一个跟物体接触的探针给出物体上的三维点。通过测量位于每个探针末端的两个线圈间的电磁耦合即可检测出探针移动。

探针偏转的电容性敏感如图 5.11 所示。敏



敏感线圈中感应电压 (mV)

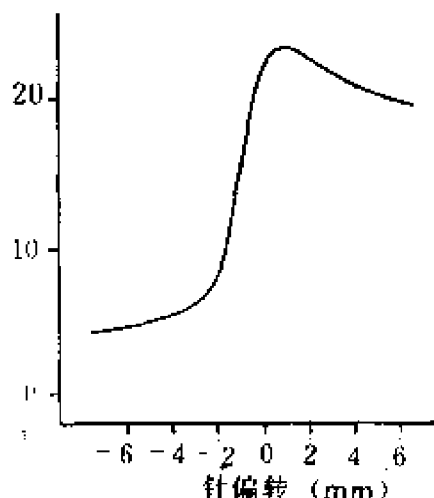


图 5.10 探针偏转的电感敏感

感探针是电容跟偏转成比例的可变电容器。通过线性电压激励电容器测量电容和所产生的电流。电容器电流

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (5.4)$$

式中  $C$  是敏感元件的电容(法拉);  $i$  是电容器电流(安培);  $dv/dt$  是电容器两端的电压变化率, 对线性电压该值是常数。因此, 传感器电流与电容器电容成正比。这种检测方法的优点是探针偏转的测量结果是绝对值。

上述平行探针的缺点是弯曲时易损伤, 优点是可获得精确的

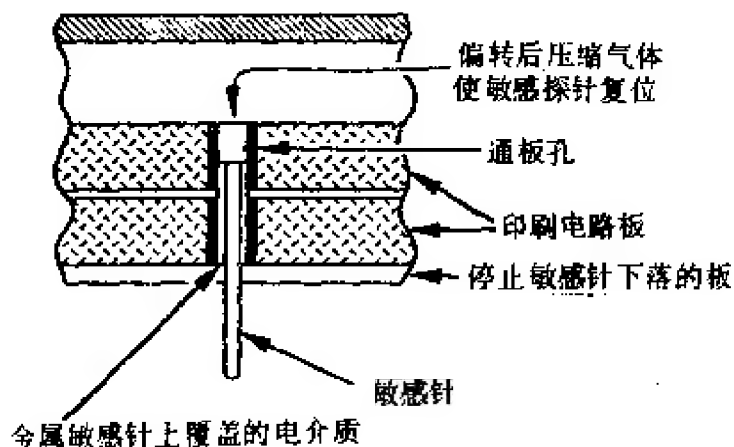


图 5.11 探针偏转的电容敏感

三维表面轮廓。

#### 5.2.4 三维探针

三维探针如图 5.12 所示，它是一种三自由度的定位器件，通

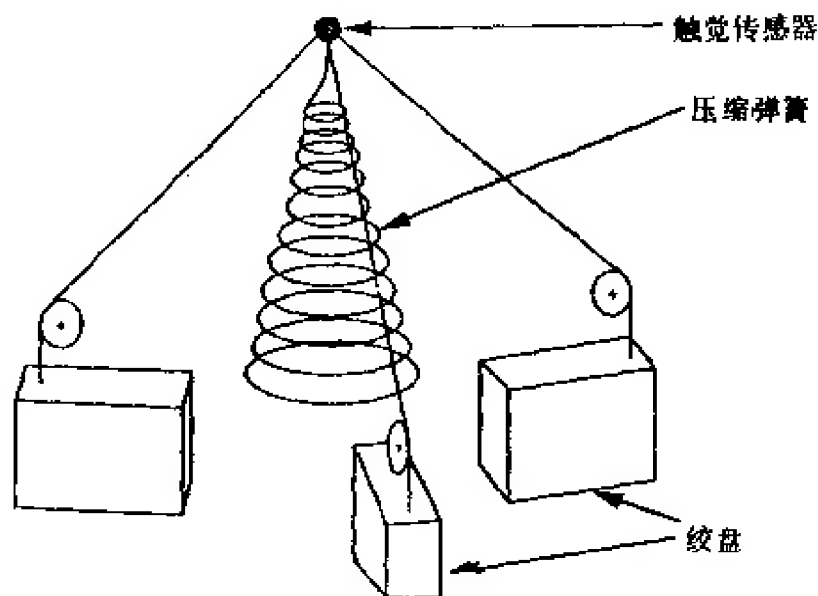


图 5.12 三维探针的原理图

过控制绞盘和三维空间传感器精确定位。绞盘调节 Kevlar 钢筋束长度，使其接触传感器。圆锥形压缩弹簧使钢筋束处于绷紧状态，因此，传感器位置仅取决于三个绞盘的位置和三根钢筋束的长度。这种结构有简易、精确和耐损伤等优点。压缩弹簧在正常状态 and 动

态条件下能使钢筋束保持绷紧状态。但是，该系统受冲击或过载时容易破坏，因而必须避免损伤探针和防止外部物体传递过大的力。

为了测量被接触物体的物理性能，触觉探针应承载传感器。这些性能包括温度、热柔性、电导率和表面接触。

图 5.13 是小型计算机的键盘和显示器的示意图。计算机的这一部分通过组合接触和安装在三维探针上的热传感器进行扫描。图 5.14 给出传感器系统获取的表面轮廓和信息。

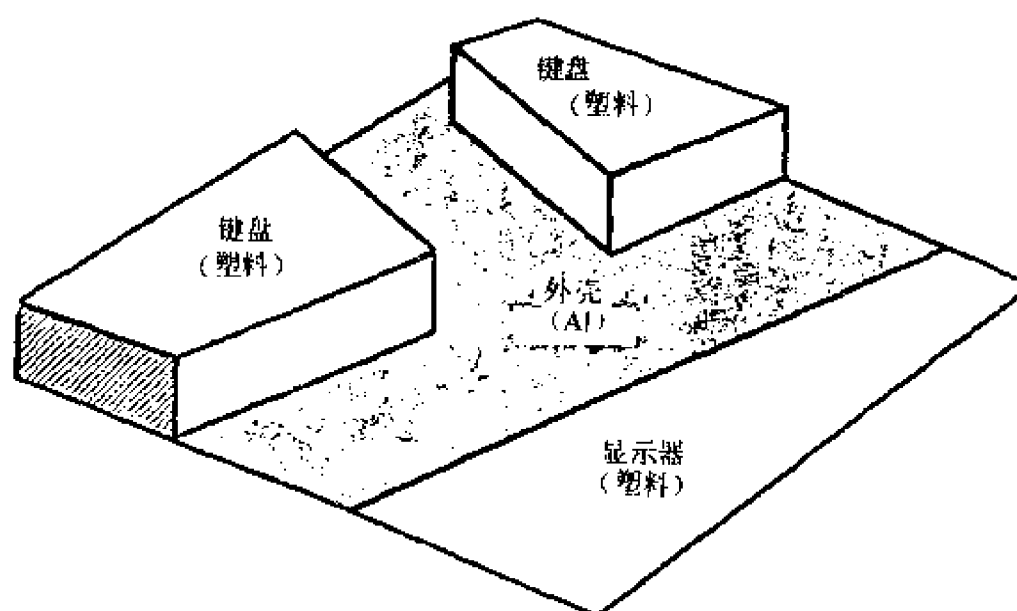


图 5.13 小型计算机的小面积键盘和显示器

### 5.2.5 阻抗层析 X 射线摄影的触觉传感器

如图 5.15 所示，它用于监控乳胶膜片的形状，通过测量膜片下方容纳一定容积液体的电导率来实现。物体压入膜片表面时，导电液（含乙烯乙二醇和其他添加剂的防冻剂）产生位移。原型传感器包括 16 个电极的线性阵列，该电极用于检测电导率产生的变化。两对电极间加上交流电压，测量其余电极间的电压。两电极间导电液的体积可通过假设均匀截面宽  $W$ 、高  $H$  和长  $d$  而近似地求出。采用这种近似法，电极间的电阻

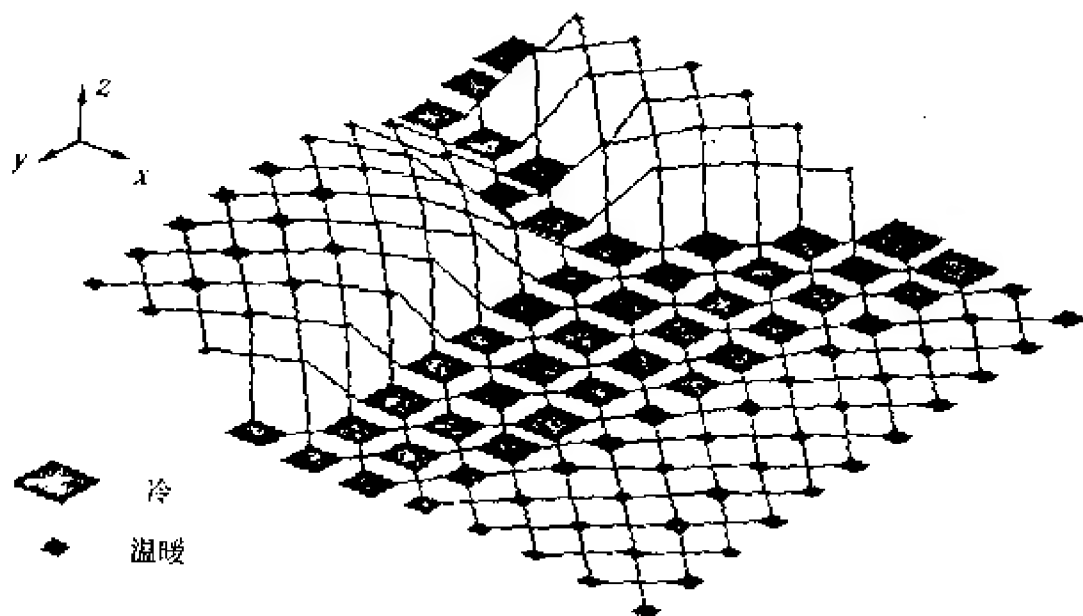


图 5.14 通过计算机键盘和显示器三维探针扫描部分产生的表面轮廓信息

$$R = \frac{\rho \cdot d}{H \cdot W} \quad (5.5)$$

式中  $R$  是元件电阻； $\rho$  是防冻剂的电阻率； $d$  是电极间的间距； $H$  是电极和乳胶膜片之间的距离； $W$  是传感器的宽度。

1988 年 Helsel 等报道的传感器<sup>[1]</sup>， $W=1\text{cm}$ ， $H=2\text{mm}$ ， $d=0.6\text{mm}$ 。假设一个小的压痕不改变流过传感器的总电流，则

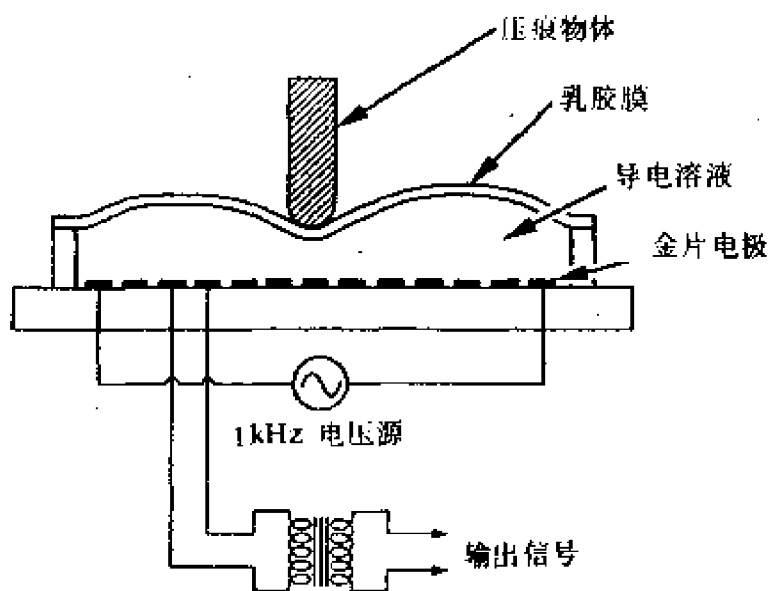


图 5.15 阻抗层析 X 射线摄影的触觉传感器截面图

$$\delta_v = \frac{\delta_H}{H} V \quad (5.6)$$

式中  $\delta_v$  是两电极间的电压变化； $\delta_H$  是乳胶膜片的高度变化； $V$  是外加电压。

试验表明，预测和观察的电极电压有好的一致性。原型传感器仅含有 16 个电极的线性阵列。为了检测压痕物体的表面形状，需要二维电极阵列。胶化剂添加到导电液中，可提高传感器柔性和改进抓握能力。

### 5.2.6 柔性匹配

所谓“柔性匹配”是使用刚性传感器的一种方法，如图 5.16 所示刚性传感器多半是根据硅集成电路技术制作，作为柔性传感器的一部分。

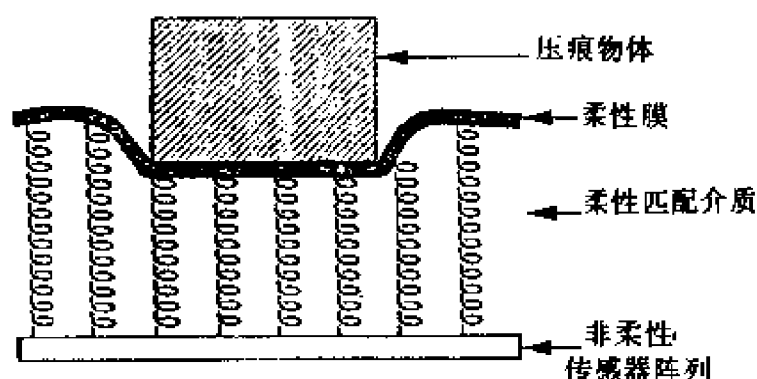


图 5.16 柔性匹配示意图

柔性膜片可制成跟压痕物体的形状一致。膜片形变通过柔性匹配介质传递到非柔性传感器。通过弹簧或泡沫橡胶的接触，或通过静电、磁和光耦合的非接触均可获得柔性匹配。

图 5.17 示出应用柔性匹配的传感器截面图。传感器通过检测平行板电容器的电容变化来测量硅膜片的偏转，这种电容器的一块极板置于隔板上，另一块极板跟支撑玻璃板接触。膜片由于一侧的基准空腔和另一侧的可压缩气室之间的压力差而偏转。物体压入传感器时，空气通道被压缩，通道内的空气压力增大，从而

使硅膜偏转，并提高平行板电容器的电容。外部电路用于测量每个平行板电容器的电容，并间接测量传感器表面的轮廓。因此，压缩空气的回弹性提供传感器柔性匹配。

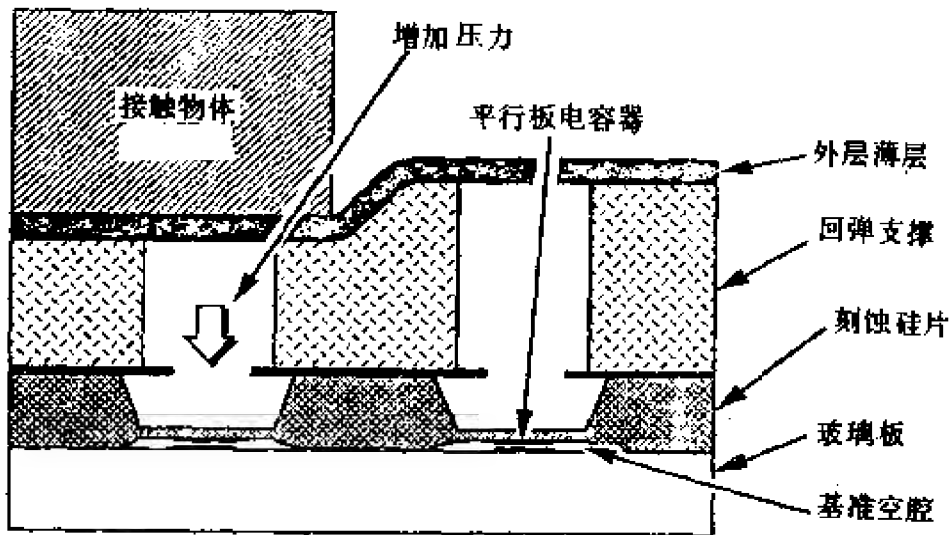


图 5.17 电容性硅触觉传感器

过去人们对柔性传感器的发展重视不够，故对这类传感器的设计考虑不多，甚至认为柔性会使位置不准确，主张不用柔性传感器。但是，柔性传感器改进了抓爪，并有较好敏感能力，这对识别物体和巧妙操作十分有利。这就提出了多大程度的柔性较合适的问题。提高传感器的柔性能改进它跟物体复杂表面轮廓一致的能力，但会降低抓爪的稳定性。传感器薄层还有滤波功能。触觉传感器的敏感元件密度不高，故很集中的压痕也许会落到邻近敏感元件之间，从而不能记录。一种低柔性的传感器薄层在大面积范围内有扩展压痕作用的趋势，故能保证用一个或多个敏感元件进行检测。实际上，低柔性薄层仅通过低的空间频率和平滑压痕物体的形状起到滤波作用。

## 第六章 接近觉传感器

接近觉、触觉和滑觉传感器之间的区别并不明显。用于告知机器人何时接近物体(或障碍物)的传感器称接近觉传感器,实现接近觉功能可采用接触或非接触技术,即有些触觉传感器也可用作接近觉传感器。触须在接触有机体表面或机器人之前,能检测是否存在物体,因此,触须传感器亦可看作接近觉传感器。

接近觉传感器主要敏感机器人手爪与对象物体的逼近程度,敏感范围可小至几十毫米,甚至一个毫米。通常接近觉传感器的任务仅是感知敏感范围是否存在物体,也有的可测量它们与物体之间的精确距离,但后者属于距离传感器的范围。

### 6.1 生物触须

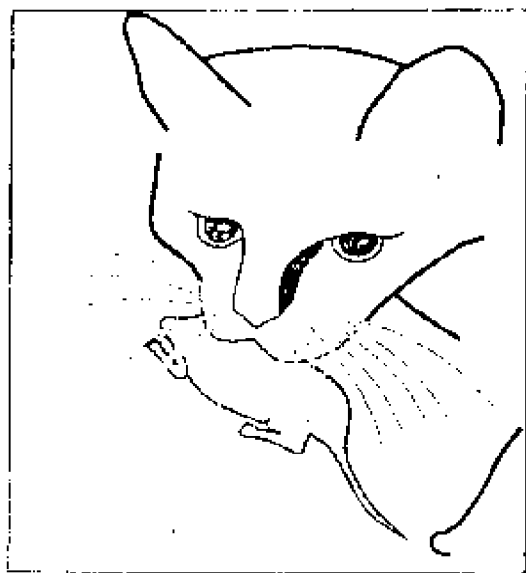


图 6.1 猫的触须

夜间活动的动物、昆虫、海产动物,甚至一些植物都依靠触须或触角探知危险、检测捕获物、感知所处环境。猫是有触须敏感功能的少数动物之一,它通过嘴捕获和处理捕获物。猫嘴中的捕获物离眼睛很近,眼睛看捕获物已模糊不清。如图 6.1 所示,触须帮助猫确定捕获动物的位置,并使捕获物紧靠鼻子或保持在上下颚之间。在猫的上嘴唇每根触须有约 200 根感觉神经末梢。这



些神经末梢能响应位移和速度。肌肉使触须敏感接近猫嘴的物体。

猫扑向捕获物或搬运东西时，触须能转变角度，并包围物体。遮住眼睛的猫能确定老鼠的位置，老鼠一旦接触到猫的触须，猫立即抓住老鼠，并很快地咬住颈背。另外猫通过触须确定捕获动物的毛发方向，从而撕碎并吃掉动物。昆虫将溶液装在触须的环境传感器中，必要时可射出该溶液。触须能敏感接触，并检测外部物体。触角上的触须能敏感气流，从而控制飞行。蚂蚁、蜜蜂和白蚁等昆虫的触须有味觉功能。昆虫的触须还能敏感温变。触须和它们的传感器阵列能构成昆虫的导航系统，从而确定是否存在食物或危险的化学制品。

## 6.2 工程触须

如同昆虫一样，机器人有硬性薄层，亦可通过触须获得有用的感觉信息。

### 6.2.1 简易触须传感器

如图 6.2 所示，一根穿过铜板小孔的钢琴丝即是廉价触须传感器。钢琴丝偏离小孔中心并跟铜板接触时，接点给电路发出信号。类似这种原理的传感器已用于机器人手臂上，以便定位和随机拾起物体。

### 6.2.2 气压式触须传感器

这种触须传感器如图 6.3 所示，它是在气动致动器基础上加以改进的装置。传感器的触须在完成提升任务后可缩回，以便自身保护。

### 6.2.3 移动式机器人触须传感器

触须传感器在移动式机器人领域里有许多用途。简易触须传

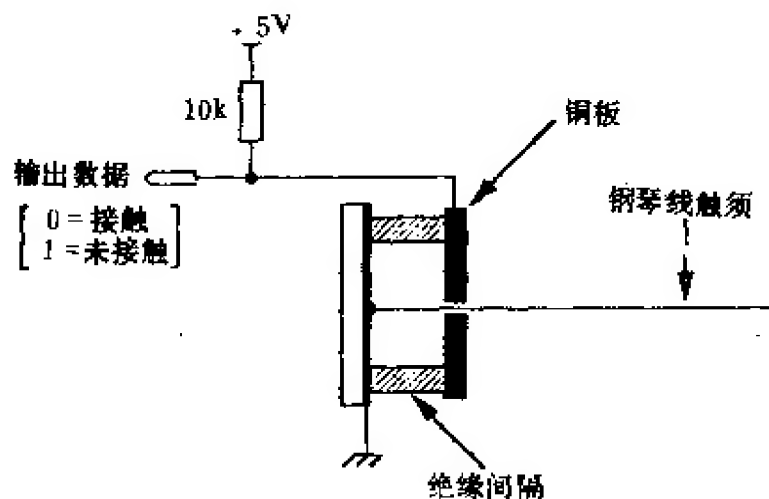


图 6.2 简易触须传感器

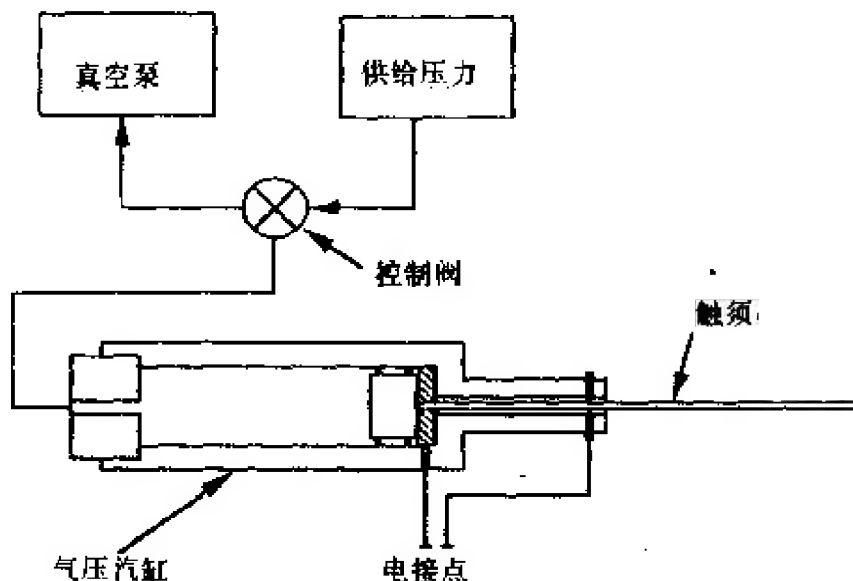


图 6.3 气压式触须探针

传感器簇可装在机器人表面的整个面积上，以便机器人避免碰撞。如图 6.4 所示，移动式机器人 Titan II 在足底部设置触须传感器。触须用形状记忆合金制成，这种合金承受大的弯曲后还不产生永久性形变。机器人的足降低，触须即可检测地面，从而使足在接触地面前减速。在足向前移动的整个过程中，触须都能敏感障碍物，故可提起足，以便越过障碍物。

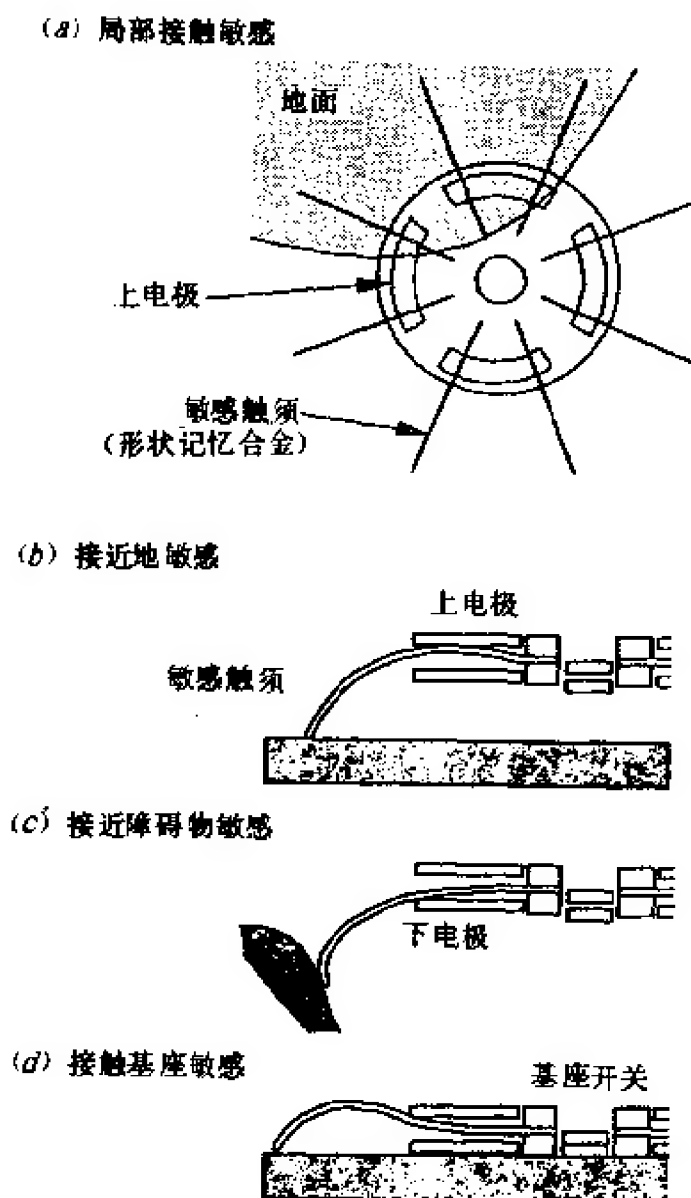


图 6.4 有腿机器人的足用触须传感器

#### 6.2.4 有关节触须探针

为了获得物体轮廓的足够信息，以便识别和确定其方位，一般要求进行几百次测量。由于机器人操作器的惯性和响应时间，完成这一任务需要花费许多时间。此外，机器人驱动链条的静摩擦或后冲会严重降低测量精度。若能提供类似于昆虫触角一样可

定位的触须及其伺服机构，上述问题便可减少。图 6.5 示出利用这种原理制作的关节式触须传感器。声圈致动器使触须在水平和垂直方向移动。冲击传感器开关或压电传感器检测触须和外部物体之间的接触。这种传感器通过追踪外部物体的外形可用于建立物体轮廓的图像。

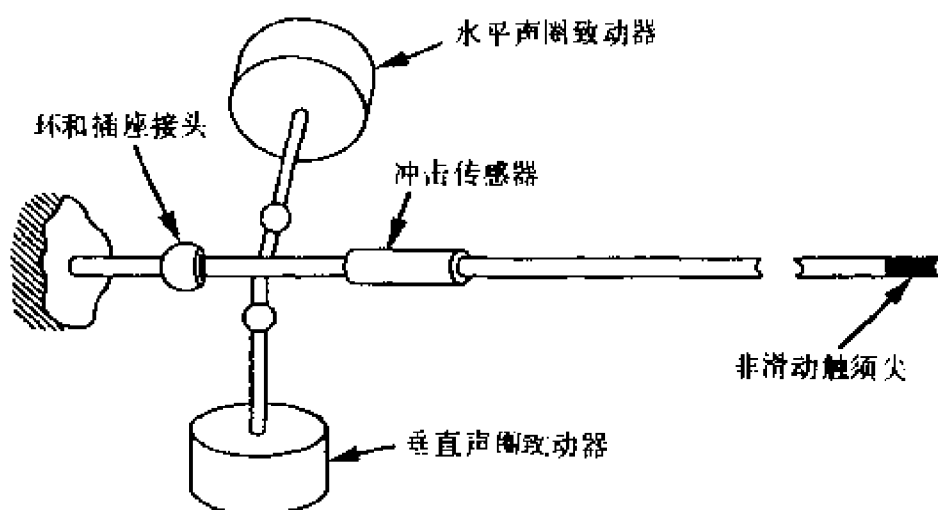


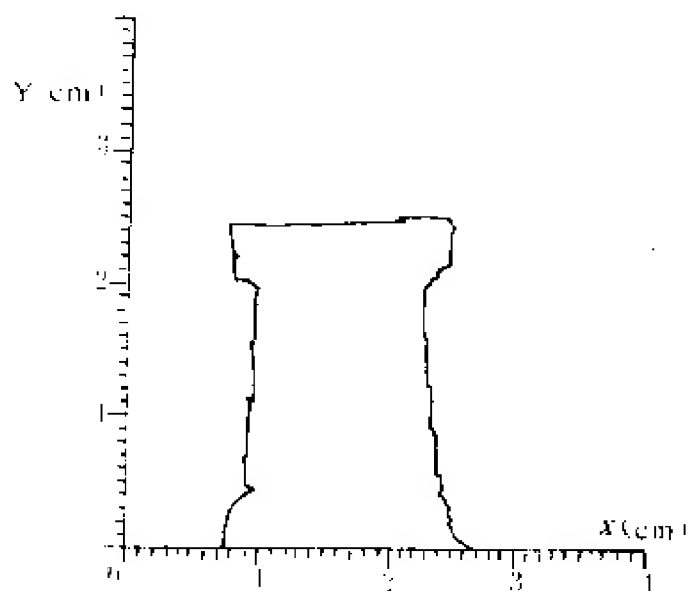
图 6.5 关节式触须探针

图 6.6 示出关节式触须探针获取的两个模子的轮廓图像。触须价格便宜，故可将大量触须安装在机器人机械手的整个表面，这样即可避开障碍物。触须在低速控制操作过程中有效，而在高速定位操作过程中没有足够的保护。

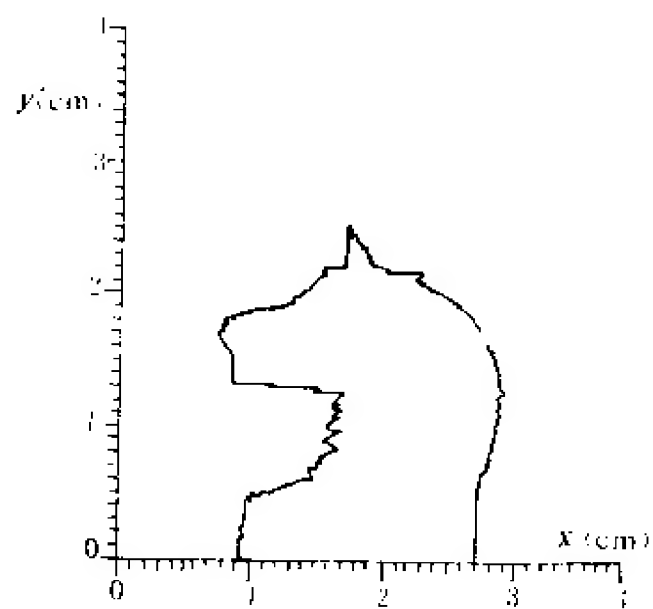
### 6.2.5 弧焊用触觉接缝跟踪

许多工业机器人应用于弧焊。为了把两块金属片焊接在一起，焊炬必须跟踪两块金属片之间的接缝。由于工件形状的变化，这种跟踪一般不能用位置坐标推算法完成。焊接时焊炬处于红外到紫外波长的光谱中，并受电磁干扰和焊剂烟雾影响。触觉敏感已用于跟踪跟焊炬接近的焊缝。图 6.7 示出触觉焊缝跟踪器的实例。这种器件含有一个绝对光学编码器，其可用于测量轴尖触觉探针的左右位移。探针必须坚固并能快速检测，且精度在  $\pm 0.5\text{mm}$

以内。



(a) 垫模的记录外形



(b) 马头模子的记录外形

图 6.6 关节式触须探针获取的轮廓图像

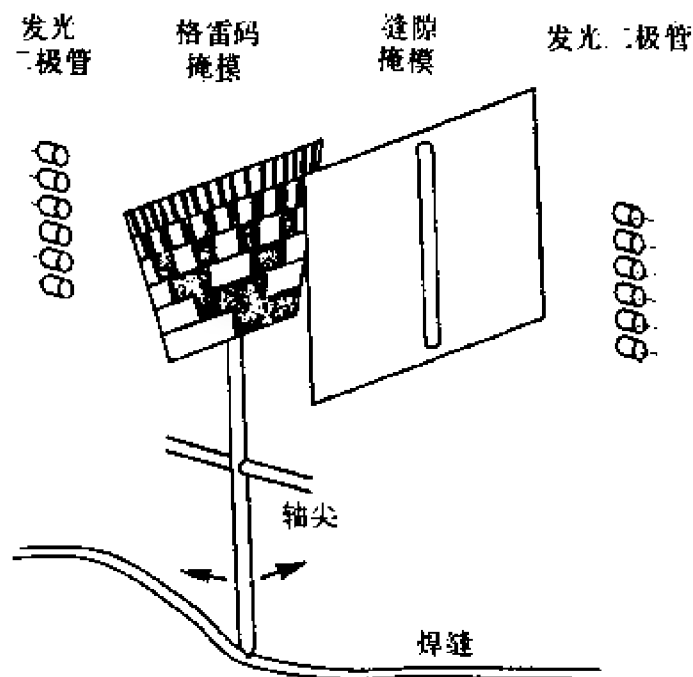


图 6.7 触觉焊缝跟踪器

### 6.3 接触接近觉传感器

接近觉传感器的最简单类型是接触型,如图 6.8 所示。这类传感器由一端伸出的圆棒和位于传感器主体内部的开关(或其他线位移监控元件)构成。机器人机械手移动时,一旦圆棒跟物体或障碍物接触,则传感器动作,即传感器内部的开关工作。通过机器人 I/O 接口监控开关状态的变化,从而产生适当的动作。这种接触监控器可安置在机器人手臂或腕部,安装多个能同时敏感障碍物和物体。

若用线性位置敏感器件代替开-关,则二进制接触接近觉传感器变成能检测物体(或障碍物)实际位置的器件。例如,一个简单的电位计或 LVDT,一旦伸出的圆棒有接触,则机械手将圆棒推进传感器。若圆棒接触到 LVDT 的磁芯或电位计的游标,则位移变换成电压,该电压跟机器人相对于某一基准点(例如抓爪的端点)的实际距离成比例。另外,通过数字微分可获得近似速度,故

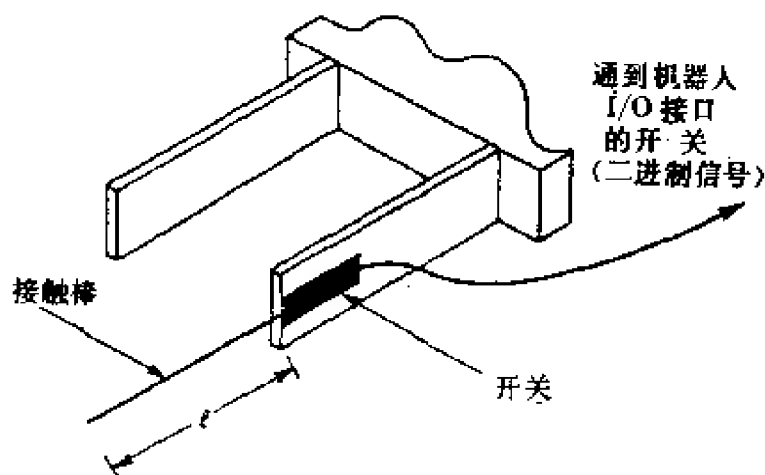


图 6.8 安装在机器人抓爪一个指上的简单接触棒接近传感器  
用接触传感器可监控距离和近似速度。

单个接触接近觉器件不能提供有关物体或障碍物形状和性质的信息(即无识别物体的能力)。但是,利用这些器件的阵列可获得某种程度的物体识别。

## 6.4 非接触接近觉传感器

机器人检测是否存在物体或障碍物,许多无物理接触的接近觉传感器均可完成这一任务。这些非接触器件可用反射光、超声波或电容、电感和电阻变化的原理进行检测。

### 6.4.1 反射光传感器

接近觉传感器中一种最简单的类型是应用物体的反射光,用于机器人抓爪的这种传感器如图 6.9(a)所示。这种传感器由光源、光电检测器和透镜构成,光源和光电检测器相距约 8mm。图 6.9(b)示出光电检测器电压随检测器透镜到物体的距离而变的曲线。图 6.9(c)示出可装在机器人抓爪上的这种传感器。采用这种方法可同时监控几个方向(如机器人手上方和下方)。

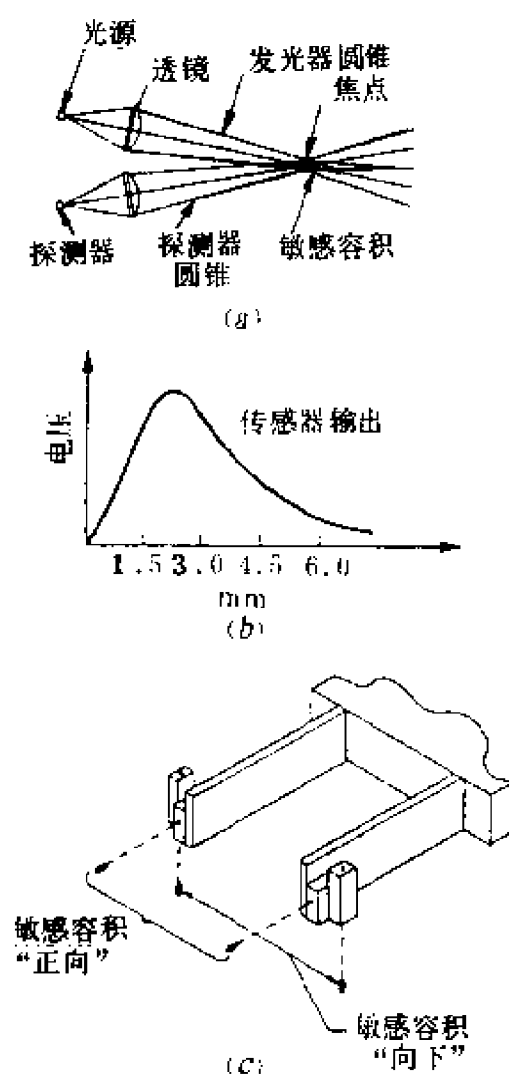


图 6.9 反射光传感器

物体(或障碍物)在焦点可产生最大传感器输出,但用这种方法亦有困难,如图 6.9 (b) 所示。除了物体刚好位于焦点,否则两个不同位置物体产生同样的电压。位置和检测器之间不存在一一对应关系,故需附加逻辑或硬件以排除二重性。例如,若机器人运动,且传感器信号增大,则说明物体位于远离焦点一侧;若信号减少,说明已通过焦点,应使用较小的距离。利用设置在不同角度的几种传感器亦可排除二重性。光纤埋置在机器人手指内,能使传感器的有效电压随距离增大而减少。

除上述困难外,反射光传感器还有其他问题,如环境光使图 6.9 (b) 中的曲线向上或向下移动,与光强有关。这个问题使光源以 6kHz 频率发生脉冲可得到解决,但传感器对物体或障碍物反射性的敏感难于克服。一个高反射表面比低反射表面产生的

输出电压大,故必须把传感器校准到对每个物体有最大的输出电压。知道检测器的特性,便可确定相对于最大位置的电压。此外,还必须小心控制,并事先知道表面反射率。

用传感器监控绝对位置有困难,原因是器件对光源输出的变化,检测器特性的偏移(周围温度变动所造成),以及周围环境导



致物体反射率的变化十分敏感。为了获得机器人抓爪对物体的接近觉，可使用阈值检测电路。

非接触接近觉传感器用于机器人还有许多问题，故在工作环境采用其他器件实现接近觉。

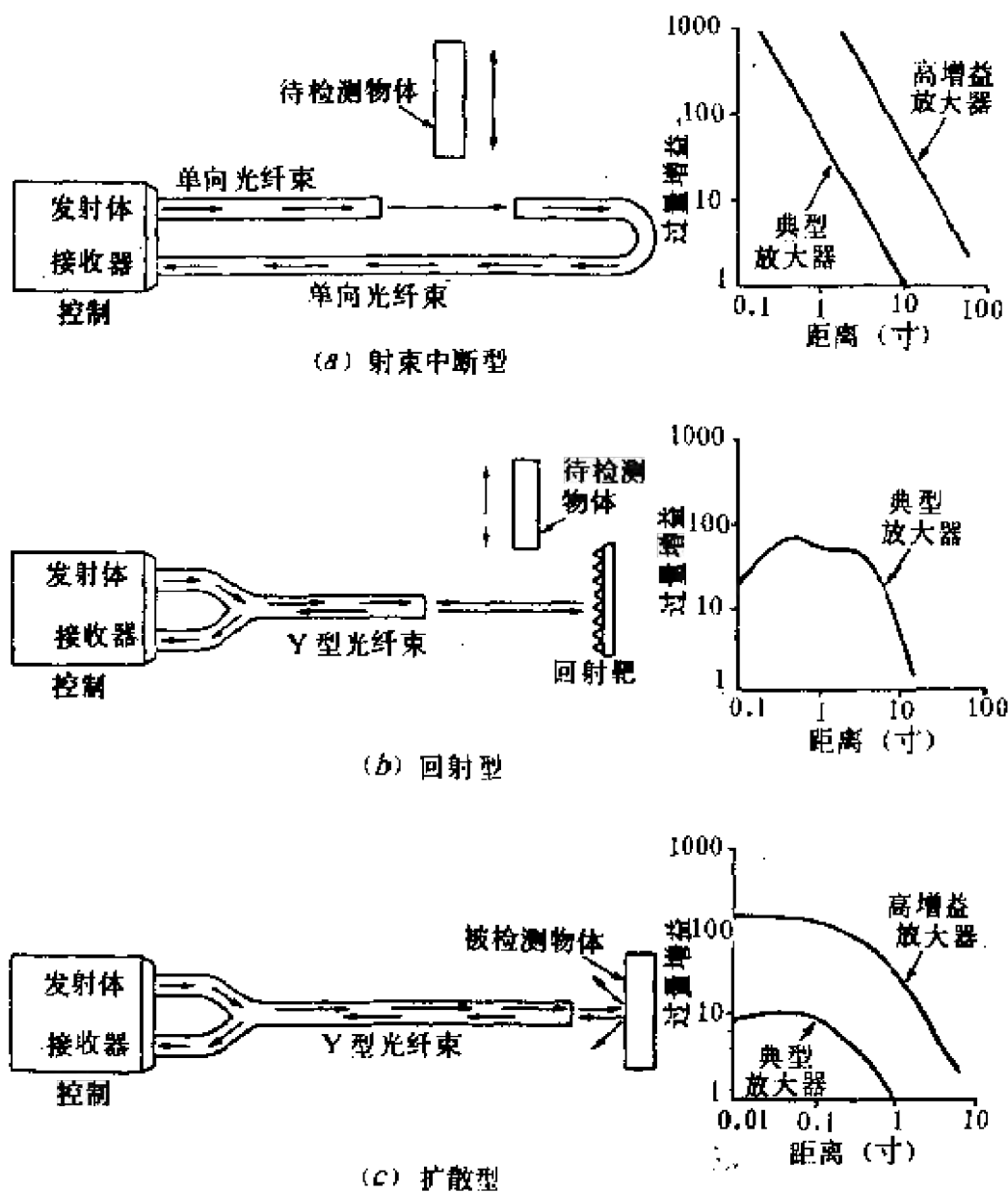
#### 6.4.2 光纤扫描传感器

光纤已用于开发不同类型的非接触接近觉传感器。据报道在机器人制造领域至少有如图 6.10 所示的三种系统利用光纤。图 6.10(a)应用传输光，而图 6.10(b)和 6.10(c)利用反射光。应注意的是在所有情况下不可能获得可靠的绝对位置信息，只能告诉有无物体存在。

图 6.10(a)示出射束中断型传感器，物体遮断光束时便被检测出来。这种传感器不能检测透光或半透光材料制作的部件。应用高增益放大器和减噪设计这种传感器可检测近到几个密耳和远到几英寸的物体，但不能把某种东西是否存在通知机器人，也就是，不能获得绝对位置信息。要求接收光纤束准直，否则会严重影响传感器的效率。是否需要采用有不同间隙或长度的装置决定于被敏感物体的类型和尺寸。

光纤接近传感器的第二种类型是如图 6.10(b)所示的器件，因其应用了位于离开装置本体的反射靶，故称回射器件。不透光物体进入光纤束末端和靶体之间时，到达接收器的反射光强度大大减少，故可检测到进入该区域的物体。此外，由于入射光束和靶体的反射光束通过物体时，两者都有衰减，故也可敏感用透光材料制作的部件。在这种情况下重要的是在传感器的接收器一侧使用阈电路。这种回射器件的设计利用 Y 型光纤束，故入射光和反射光都由同样一组光纤传送。虽然这样排除了前述准直困难，但必须用一个独立的靶才能使传感器检测部件。显然，障碍物碰到来自反射靶的光，则回射光纤传感器起敏感作用。

图 6.10(c)示出不需要回射靶的光纤接近传感器。这种传感



(a)射束中断型;(b)回射型;(c)扩散型

图 6.10 光纤扫描传感器的结构

器可测量远离光纤束几英寸的物体反射的光。因为大部分材料都能反射一定量的光，故这种“扩散”器件可检测透光或半透光的物体。如反射光接近探测器那样，这种器件在理想条件下能监控绝对位置，但也存在前述光纤传感器的问题。这种光纤敏感模式无靶、结构严密、重量轻和价廉，故它可用于制造现场，是一种最通

用的器件。

### 6.4.3 扫描激光传感器

图 6.11 示出的接近觉传感器由激光源、两个反射镜(其中一个由电动机驱动)和透镜-光接收器构成。这种扫描激光器在工业机器人已应用于弧焊弯曲物体。来自 He-Ne 激光器的射到物体表面的入射光束经由电动机驱动三角形反射镜的动作越过物体表面扫描。值得注意的是,电动机每转动一转这种动作发生三次。装在光探测器(如光敏晶体管)前面的透镜只允许物体表面一点的光反射。传

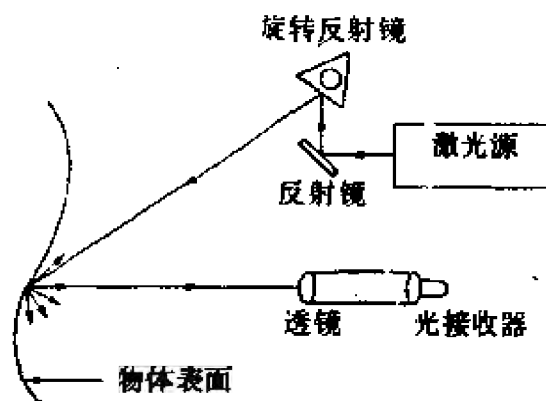


图 6.11 扫描激光接近觉传感器

感器到这点的距离用高频钟脉冲的交流电动机电压同步予以确定。从电压为零的时间开始一直到光探测器接收到反射光的钟脉冲数是距离的量度。通过装在机器人末端操纵装置上的传感器获得跟踪(如焊接的情况),传感器可移动到空间不同位置。这种接近技术用于黑色、透光或极光亮的物体还存在问题。

### 6.4.4 超声波传感器

多年来已用超声波测距和提供图像信息。例如,本世纪四十年代用声纳敏感系统探测潜入海底的生物,七十年代用超声成像提供人体各种器官的图像。Polaroid 公司声纳敏感元件的问世将超声波测距带到了非专业性照相市场。用于照相机时,Polaroid 公司的传感器能产生超声波脉冲,从而测量反射波束(或“回波”返回到传感器时间)。这种信息可用于测量到物体的距离,并根据测量结果自动调节照相机的焦距。近年来,这种器件及其类似的探测器已在机器人中应用。

声纳敏感技术有几种，机器人是应用产生正弦波形短脉冲群的器件，其频率高于声频范围(如 40kHz)，图 6.12 示出这种传感器的方框图。外加一个初始信号时，发射(正弦波)振荡器能在 1ms 之内起振，从而产生 40kHz 的振动。此外，一个取样窗能使特定时间间隔的与门起动，从而对待计数的反射脉冲(从回波来的)计数。这种计数跟换能器到物体的距离成比例，故调节取样窗能改变传感器的最大测距范围。寄生信号造成的误差，可用窄带滤波器调谐发射波束频率防止。这种由发射器发射的直达波，由于熄灭脉冲的作用可不计数。这种熄灭脉冲保持计数器不起作用，一直到发射振荡器停止振荡。

在 Polaroid 器件的情况下，实际短脉冲群为 50、53、57 和 60kHz，这样可克服待扫描物体表面形态，从而将实际看不见的物体信息提供给传感器。

采用一组频率可能产生的问题是匹配影响频率灵敏度，从而反射一定能量。补偿这种不利后果，采用跟器件相连的敏感电路是很复杂的，因为它们必须控制四种不同频率而不是上述的单一频率。据报导 Polaroid 传感器的精度大约为测量范围的 1%。

Polaroid 公司的声纳传感器阵列已由美国国家标准局用于建立一个关于工业机器人的声纳能量安全防护屏蔽。若这种防护被进入工作空间的人破坏，则机器人立即停止工作，并在它能重新工作前重调。这种设计能防止偶然发生的故障，甚至当一个人侵者完全进入工作机壳内也可避免故障。应注意，声纳屏蔽虽已重新建立，但还不能安全操作时，不能允许机器人继续移动。

超声波传感器已在移动式机器人中用于确定离墙壁或障碍物的距离，这种传感器由于轮子滑动而无位置校准，但采用由步进电机旋转 180°，单个声纳传感器可消除这一问题。知道机器人的路径，利用装在驱动轮伺服电机上的增量型编码器即可获得距离信息。通过对比声纳传感器得到特殊界标(如墙壁)的实际距离和编码器给出的距离，则可在行进中随时重校准系统。根据重校准调节

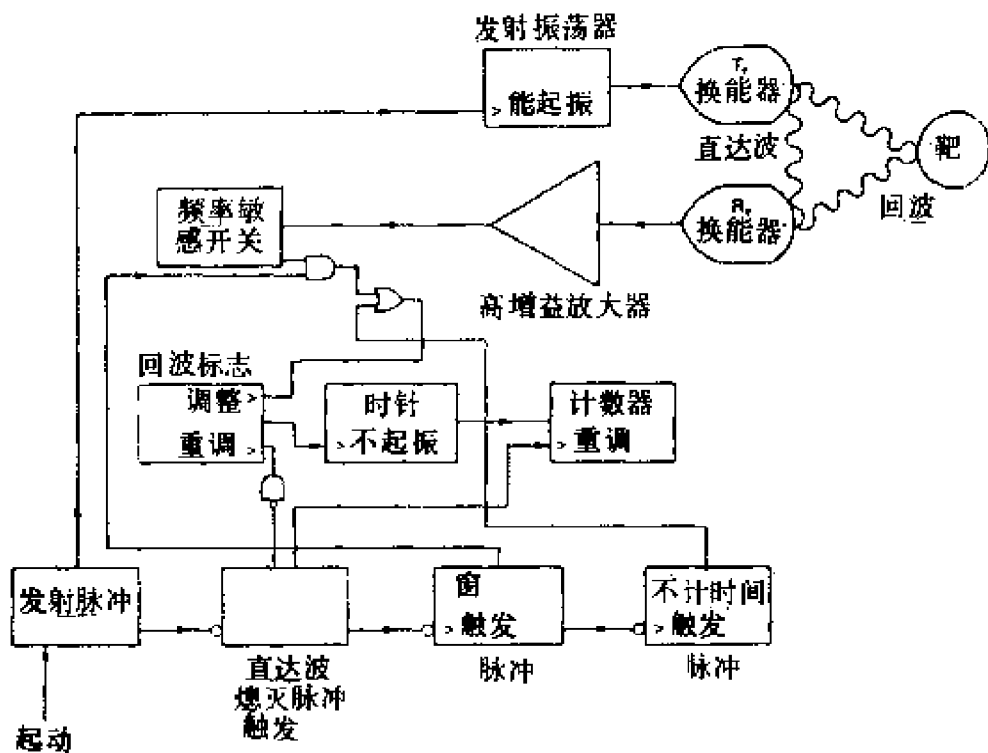


图 6.12 脉冲声纳非接触接近传感器的框图(T 和 R 分别表示发射和接收)

位置计数器,采用这种程序获得的位置误差约 0.5%。另一种移动式器件是把 14 个窄角度超声传感器装在 French HILARE 机器人的不同位置。这些探测器的发射角为 30°,而接收角为 15°。需要大量的传感器才能消除机器人周围的盲点。这些盲点是由于使用窄角度探测器造成的。这种器件的测量距离约 2m,测量精度约 0.5cm。

#### 6.4.5 涡流传感器

典型涡流传感器是利用一个敏感线圈在含铁的或不含铁(如铝)的导电靶中感应高频(涡流)电流。传感器产生的振荡幅度取决于金属表面跟线圈之间的距离,以及电路中的磁核含量。因此,通过监控传感器振荡幅度便可获得位置。

振荡器如图 6.13 所示,传感器探针线圈附近存在金属靶会

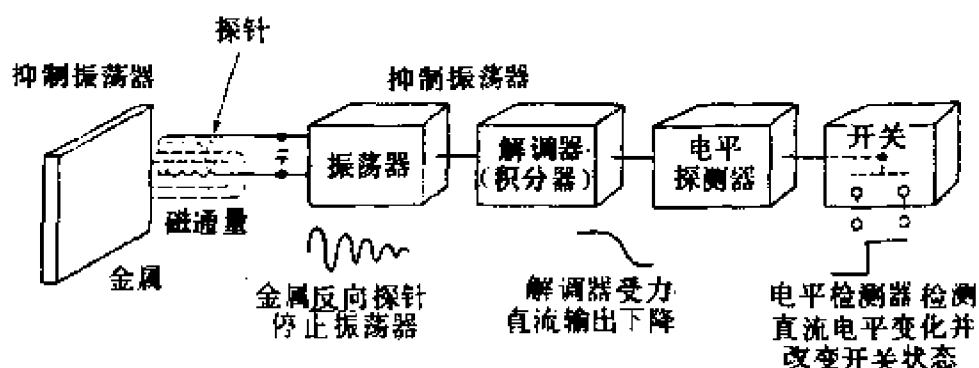


图 6.13 涡流式非接触接近传感器(除去电平检测器和开关, 这种器件可监控绝对距离)

使振荡器的幅度下降, 因而产生阻尼。解调器(实质上是积分器)通过产生较小直流输出响应这种变化。在接近开关应用中, 电平下降到某预定值以下时, 便可利用阈电路检测电平下降到预定值点处开关的变化状态。通过调节阈值, 机器人机械手可在离物体要求的距离停止。这种设计也可用于机器人工作室内阻止末端操纵装置跟其他机器部件由于疏忽造成的碰撞。

除了阈电路和开关外, 用从解调器来的实际直流电平亦可提供有关传感器离物体的绝对距离。一些厂家已将这类器件用于确定机器人的重复性和精度。装在机械手末端操纵装置上的涡流传感器告知机器人离金属部件的距离。这种传感器和机器人可用于检测制造过程中的各种部件(如轴和整流子的尖削度、板和圆盘的平直度或非导体材料的厚度)。这类传感器还可用于检测金属部件。

涡流传感器能在油渍和灰尘污染的区域, 以及在温度和湿度有显著变化的场所可靠地工作, 故它非常适合在制造环境应用。表 6.1 给出涡流传感器的技术性能, 其线性度为 0.5%, 模拟分辨率为  $(1 \sim 30) \times 10^{-5} \text{mm}$ 。这种传感器可用于测量静态和动态位移, 它能在不同负载下确定机械手的位置过冲量。这类传感器能敏感高达 50kHz 的频率变化, 故用于测量移动金属物体的不连续性。

这种器件的主要缺点是必须校准用作靶体的不同金属材料(如铝和钢会产生不同的传感器输出),从而在机器人应用中,对不同材料的被检测部件应重新校准检测器。同样,根据传感器的尺寸确定有效线性测量范围,距离大,要求探针也大。例如,一个 $\phi 5\text{mm}$ 的装置敏感距离高达 $1.5\text{mm}$ , $0.03\text{mm}$ 的距离仅需要 $\phi 0.2\text{mm}$ 的装置。

表 6.1 涡流传感器的技术性能

型号	KD-2310	KD-2310	KD-2310	KD-2310	KD-2310	KD-2310	KD-2310	KD-2310	KD-2310	KD-2350	
性能	-25	-1U	-1S	-2UB	-2S	-3U	-4S	-6U	-15U	-30U	单位
靶材料											
非磁性	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是	
磁 性	非	非	非	是	是	是	是	是	是	是	
测量范围	10	40	40	80	80	120	160	240	600	1200	mil
( $\pm 20\%$ 标称偏移)	0.25	1	1	2	2	3	4	6	15	30	mm
非线性度	0.05	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6	0.8	1.2	3.0	6.0	$\pm\text{mil}$
(测量范围的0.5%)	0.00125	0.005	0.005	0.01	0.01	0.015	0.02	0.03	0.075	0.15	$\pm\text{mm}$
分辨率 $\leq$ 中间范围											
模 拟	0.004	0.004	0.004	0.008	0.008	0.012	0.016	0.024	0.060	0.120	mil
	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003	0.0004	0.0006	0.0015	0.003	mm

#### 6.4.6 电阻敏感

弧焊机器人应保持焊接工具的喷嘴到焊缝的距离恒定,焊接喷轮的速度也应恒定,这样才能控制焊接的均匀性和强度。机器人精确跟踪焊缝可获得优良的焊接,该技术称“弧电阻敏感”。这种技术的基本原理是使加给焊接工具的电压恒定,弧电阻(或更准确地说是电流)是喷嘴高于焊接表面高度的量度。焊接通常产生大的电流( $100\sim 200\text{A}$ ),故可利用感应电流监控。

在气体金属弧焊(GMAW)的情况下,普遍采用的焊接方法称金属惰性气体(MIG)技术。惰性气体的覆盖层(氩、氦、二氧化

碳)保护焊接喷灯电极和焊接材料不暴露在空气,以免快速氧化。电极是鼓轮连续供应的金属线。电极的金属在MIG处理中用作填料,故金属线的组成应根据焊接的性质而定。这种焊接的弧电流  $I$  和电压  $V$  之间有如下关系:

$$V = R(h - L)I$$

式中,  $R$  是电极线每单位长度的平均电阻;  $L$  是弧长度;  $h$  是工具喷嘴离金属表面的高度。通常  $V$  是一个常数,故  $I$  是  $h$  的反函数。因此,通过调节机器人的位置,可使弧电流保持稳定。例如,在MIG处理中,若  $h$  变化  $0.1\text{mm}$ ,则  $I$  变化  $1\sim 1.5\%$ 。

自动焊缝跟踪问题用上述方法即可解决,如图 6.14 所示。在敏感弧位置中,焊接工具在两块金属间反复移动,这种动作称迂回行进,它对许多机器人(如 Unimation PUMA550)的选择性运动有用,这种运动的振幅可变。若正好跟踪焊缝中心,则迂回行进(或振荡)中最大和最小弧电流相同。若焊接喷枪离开焊缝中心移动,则这两种电流不同。该误差信号则可用于机械手的重新组合。在焊接喷灯振荡的中心取样弧电流,并将其跟焊接材料的基准值对比,这样即可控制垂直高度  $h$ 。基准和实际电流之间产生的误差信号可用于再调高于焊接表面的机器人位置。

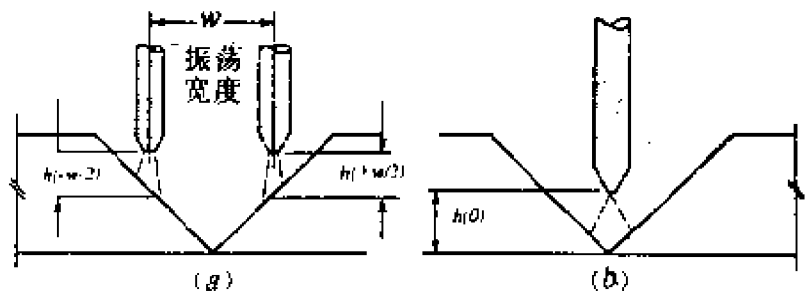


图 6.14 弧焊应用中自动跟踪焊缝的弧电阻(位置)敏感

#### 6.4.7 霍尔效应传感器

霍尔效应传感器永久磁体构成图 6.15(a)的装置时,可用于检测铁磁物体。在这种情况下,若在该装置附近没有铁磁物体,



如图 6.15(a)所示,则霍尔效应传感器受到一个强磁场作用。铁磁物体靠近该装置时,由于磁力线被铁磁体旁路,如图 6.15(b)所示,则传感器感受到的磁场减弱。

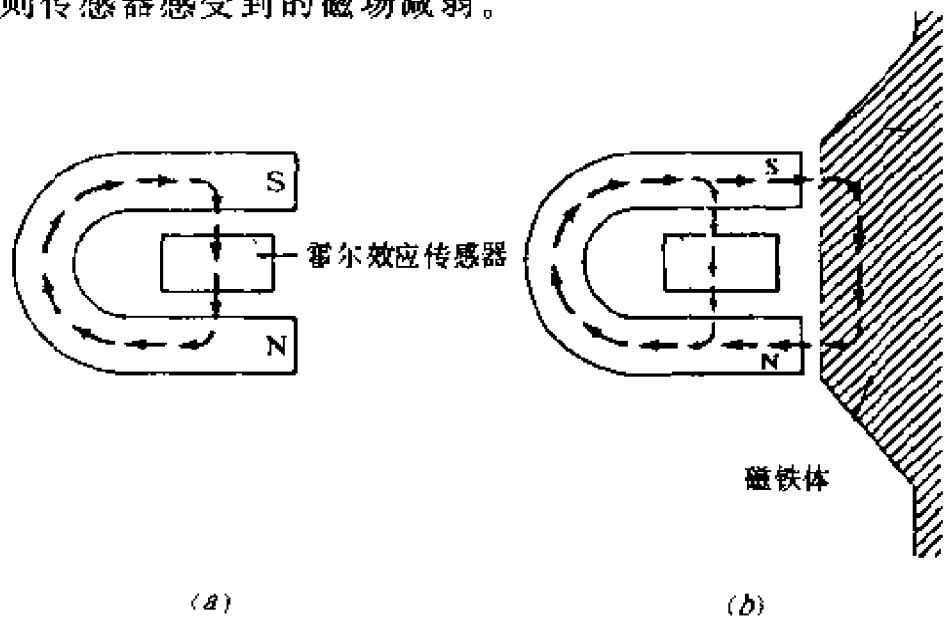


图 6.15 由霍尔效应传感器跟永久磁体构成的接近觉传感器原理图

霍尔效应传感器的工作依赖于作用在磁场中运动的带电粒子  $q$  上的洛伦兹力  $F$ 。该力垂直于带电粒子的运动速度  $v$  和磁场强度  $B$ , 即  $F=q(v \times B)$ 。电流通过置于磁场中的掺杂  $n$  型半导体, 如图 6.16 所示。在  $n$  型半导体中, 电子是多数载流子, 故电流方向应与电子运动方向相反, 因此, 作用在载有负电荷的运动粒子上的力, 其方向如图 6.16。该力作用在电子上, 从而使电子汇聚在物体的底部, 故在物体上产生一电压, 顶部为正。若将铁磁体靠近该半导体和磁铁组成的装置, 则磁场强度下降, 洛伦兹力减小, 从而使半导体两端的电压减小。显然, 该电压降低的大小反映了霍尔效应传感器与铁磁物体的接近程度。在传感器中设置一电压阈值便可判断是否有物体存在。

上述使用半导体(如硅)的霍尔效应传感器有体积小, 牢固和抗电干扰等优点。此外, 还可将放大器和检测电路均集成在硅片上, 这样, 既减小了体积, 又降低了成本。

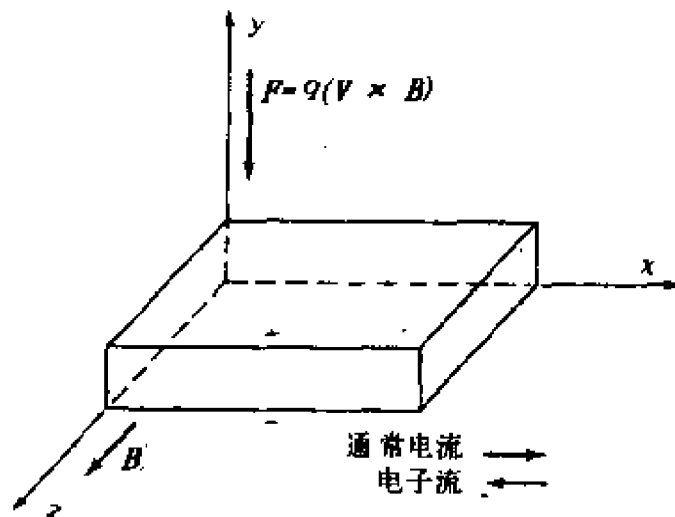


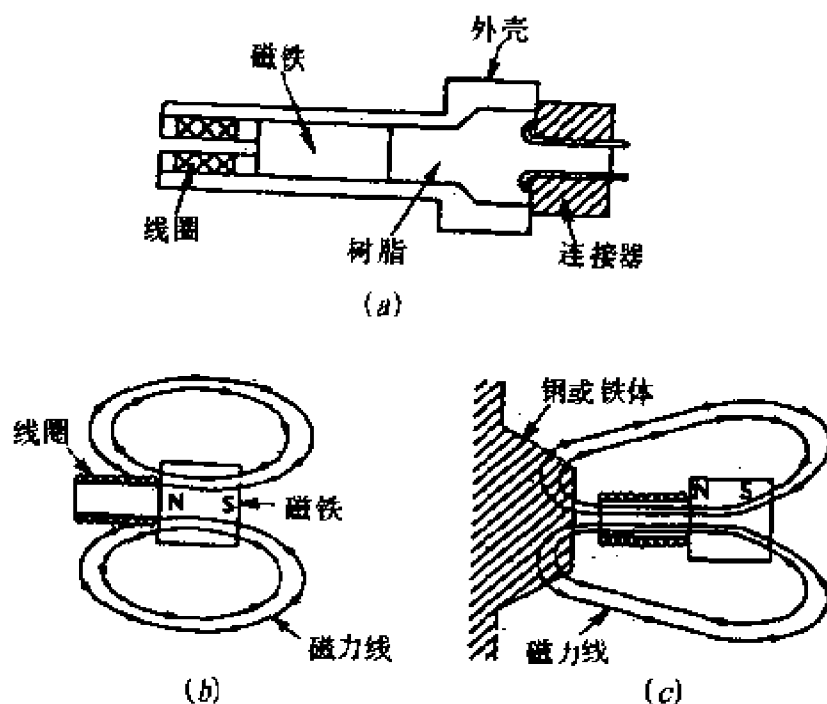
图 6.16 霍尔效应示意图

#### 6.4.8 感应传感器

工业上广泛应用的接近觉传感器，其基本工作原理如图 6.17 和图 6.18 所示，它是利用金属物体引起电感变化。图 6.17(a) 示出感应传感器的工作原理，其由框架内的永久磁铁和靠近该磁铁的线圈构成。传感器接近铁磁体时，永久磁铁的磁力线形状发生变化，如图 6.17(b) 和 6.17(c) 所示。静止状态下，因为没有磁通量变化，故线圈中没有感应电流。铁磁体靠近或远离磁场时，磁通量发生变化，从而感应一个电流脉冲，该脉冲的幅值和形状决定于磁通量的变化率。

图 6.18(a) 示出线圈两端的电压随铁磁体进入磁场的速度而变化，电压极性决定于物体是进入磁场还是离开磁场。图 6.18(b) 示出，随距离增加，灵敏度急骤下降，有效作用距离小于 1mm。

这种传感器仅在有相对运动时才产生输出电压波形，故对输出波形积分便可得二值信号。积分值小于某一特定阈值时，二值输出为低电平；反之，二值输出为高电平（表示接近某一物体）。



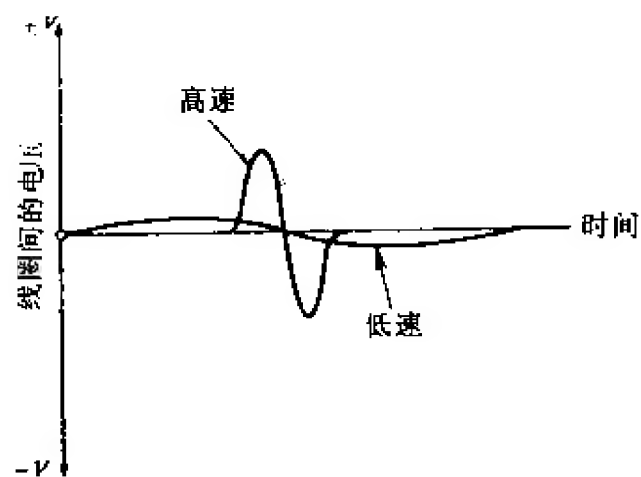
(a) 感应传感器；(b) 无铁磁体时磁力线的形状；  
(c) 铁磁体接近传感器时磁力线的形状

图 6.17 感应传感器原理图

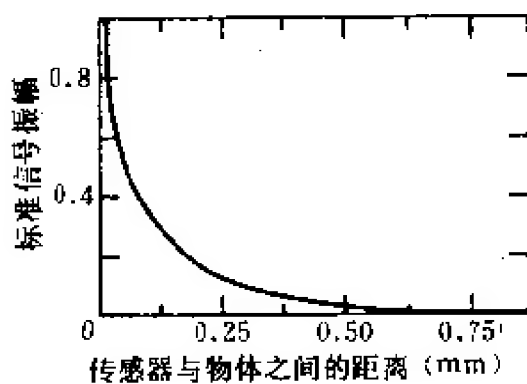
#### 6.4.9 电容传感器

前述霍尔效应传感器和感应传感器仅能检测铁磁体，而电容传感器能检测几乎所有固体和液体材料。图 6.19 示出电容传感器的结构示意图，敏感元件是电容，它由敏感元件电极和参考电极构成。电容元件后面充满干燥空气，以便隔离。传感器电路用树脂气封在传感器内。

根据电容变化检测接近程度的方法有许多种，其中最简单的一种是将电容器作为振荡电路的组成部分，设计成只有在传感器的电容值超过某一预定阈值时才产生振荡。将起振转换成输出电压，用以表示物体的出现。另一种较复杂的方法是把电容元件作为受连续参考正弦波驱动的一部分。电容的变化引起参考信号和来自电容元件的信号之间的相移，相移正比于电容的变化，故可通过相移检测接近程度。



(a)



(b)

(a) 感应传感器的响应速度;

(b) 电压幅值与感应传感器到物体的距离

图 6.18 感应传感器的响应速度与距离

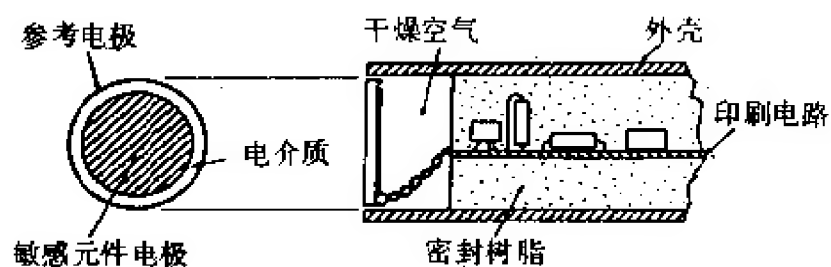


图 6.19 电容传感器的结构示意图

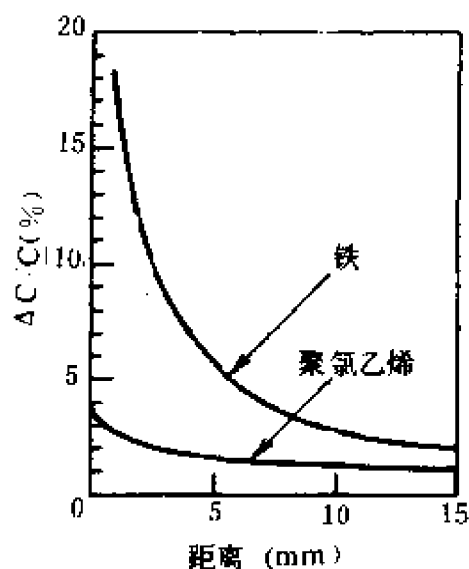


图 6.20 电容传感器的距离响应

图 6.20 示出上述传感器其电容变化与距离的关系。由图可看出，距离超过几毫米时，灵敏度急剧下降，响应曲线的形状与待测物体的材料有关。这种传感器以二值方式工作，根据阈值  $T$  规定的检测界限，电容的变化大于阈值  $T$  表明物体存在；反之则表明没有物体存在。

## 6.5 机器人弧焊传感器

焊接机器人经常碰到的问题是编程路径跟焊接的实际路径不一致，因此，路径发生偏差时，需要传感器通知机器人，以便重新定位执行焊接任务的工具。前面介绍了用非接触技术使喷嘴跟踪焊缝，下面介绍几种用接触敏感方法跟踪焊缝的传感器。

### 6.5.1 简易有源光学焊缝跟踪器

有源光学弧焊跟踪传感器如图 6.21 所示。接触传感器的指针通过指令机器人降低安装传感器的工具，直到跟金属表面接触。开始焊接时，机械手沿预编程的路径移动。预定路径和实际焊缝

之间不一致会导致移动中传感器指针偏离焊缝方向。焊接跟踪器的光源检测出这种偏离,并给机器人控制器提供需要的误差信号,从而修正预编程规定的路径。

跟光源焊缝跟踪器一同使用的光学传感器如图 6.22 所示。其由六个发光二极管(LED)、光电探测器(光电二极管)、格雷码掩模和准直裂缝构成。指针首次位于焊缝时,裂缝提供的窄视窗产生一个特殊的 6 位二进制“字码”,该字码可记录或存储在存储器内(即校准相位)。通过光电传感器输出(即二进制字码)的定期抽样,指针偏离焊缝时能确定偏离最初位置的程度。因使用了六位,故采用这样的设计可敏感 64 个不同位置。已报道的系统位置分辨率约为 0.5mm。要说明的是,这种器件实际上是一种线性编码器。

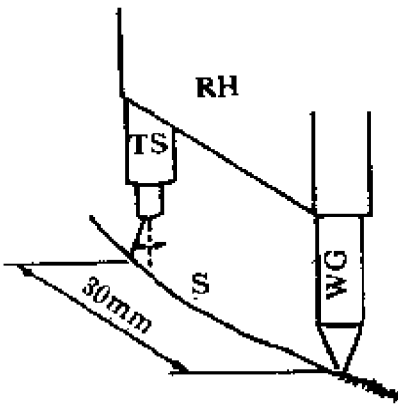


图 6.21 简易有源光学弧焊焊缝跟踪传感器(RH 是机器人手, TS 是跟踪传感器, WG 是焊枪, S 是被焊接的焊缝)

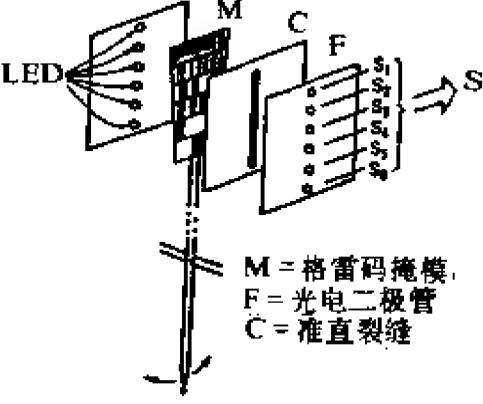


图 6.22 有源光学焊缝跟踪器用的光学传感器

选择格雷码而不是直接的二进制码是为了使检测误差减至最小。这种编码只允许连续二进制号码的 1 位变化,因而产生多于 1 位变化的位置都可作为误差。用光学探测器系统而不用电感原理系统,并以格雷码代替普通二进制码,这样能使敏感误差减至最小。

### 6.5.2 无源焊缝跟踪传感器

前述焊缝跟踪的问题是不能监控  $Z$  方向的路径变化。因此,若待焊接金属表面与最初编程时的轮廓不同,则有可能使敏感指针离开焊接,或被力向下驱动,从而损伤检测器。虽然弹簧在某种程度上能阻止发生这种情况,但是,在那些变化相当大的地方,监控指针的实际垂直位置十分重要。

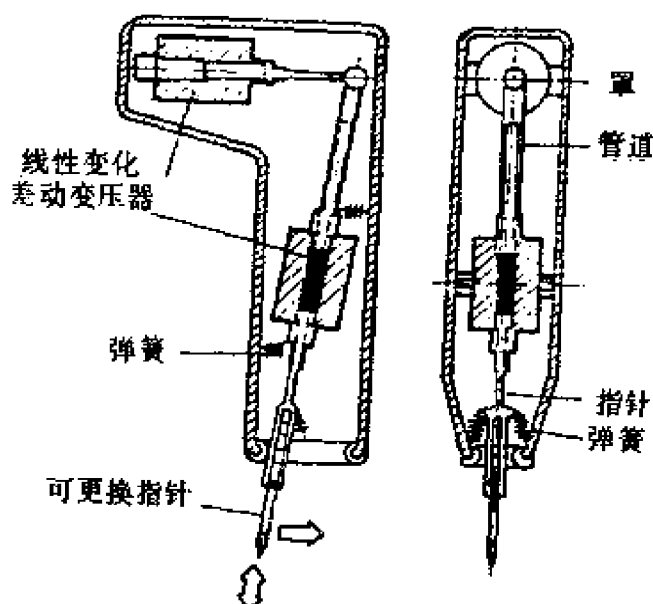


图 6.23 具有两自由度的简易无源弧焊焊缝跟踪传感器

图 6.23 示出简易无源弧焊和焊缝跟踪传感器示意图。这种传感器用两个 LVDT 检测高度 ( $Z$ ) 和横向到焊缝  $+x$  或  $-x$  的变化。指针由焊缝本身导向。

实际使用中,定期取样 LVDT 信号。指针首先置于焊缝中时,最初(或校准)值的变化可用作误差信号,该信号使机器人重新定位焊接工具。利用这种检测器的传感器,其位置分辨率取决于 LVDT 的分辨率。典型器件的分辨率比前所述(6.5.1)的好得多。

这类弧焊传感器有快速、精确、坚固和结构简单等优点,但是这种传感器也有不少问题。第一个问题是如图 6.23 所示的单向性。为了敏感焊缝相反一侧的路径偏离,往往需要旋转装置。因为

极不可能预测以什么方式发生这种变化，故这给实用带来困难。第二个问题涉及到 LVDT 本身，温度变化对 LVDT 的性能有影响，为了防止跟温度有关的零位漂移导致位置误差，从而影响焊接质量，必须定期重新校准装置。第三个问题是指针跟焊缝接触会产生阻力(摩擦)，故必须增加机器人致动器的转矩。解决这一问题的简单方法是在指针的尖端设置一个小球。

6.5.3 有源非光学焊缝跟踪传感器

图 6.24 示出有源非光学弧焊焊缝跟踪传感器的简图。该器件不依靠焊缝本身使指针运动，这跟上述两种检测器不同。一个 9.8W 重 180g 的微型电动机周期性地把指针从焊缝中提出，然后

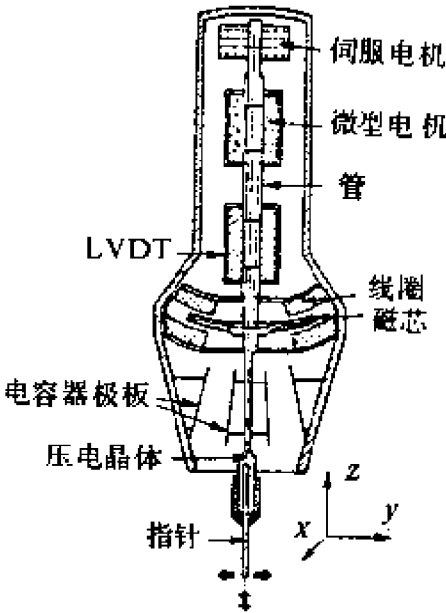


图 6.24 三自由度的有源非光学弧焊焊缝跟踪传感器

放回到原处，从而降低整个系统的阻力。这样做的重复频率是 10Hz。若跟踪复杂，频率还可增高。用压电传感器检测指针接触焊缝。及时取样 LVDT 的信号，并提供 z 方向的量度。为了补偿不可预见的金属表面高度变化，用小型直流伺服电机保持传感器足够接近焊缝的平均 z 位置，微型电机的动作使指针总是跟焊接表面接触。有选择性地供给线圈能量，使传感器产生 x 和 y 位移。线圈依次吸引磁芯，该动作类似于螺管式激励继电器的

动作。图 6.24 中示出用电容极板监控的位置。

在 x 和 y 方向驱动传感器元件的能力当焊缝间隙大时特别有用。瞬间获得的数据可用于增加机器人的曲折幅度，从而填充宽的焊缝。这种有源焊缝跟踪器减少了前述两种焊接传感器由于



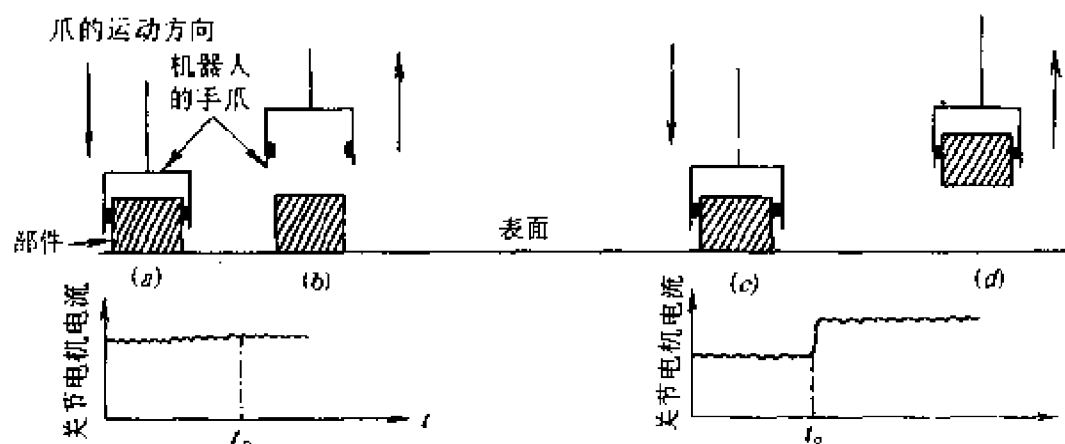
焊缝表面粗糙造成的困难，因为所应用的敏感方法是分离式而不是连续式。

这种有源非光学弧焊传感器，若灰尘填满极板间的空间，则会导致  $x$  和  $y$  方向的测量误差。解决的方法是定期清除灰尘。

## 第七章 滑觉传感器

人手的功能之一是它能感知所抓握的物体的滑动。跟手有联系的生物控制系统根据滑动接收器获取的信息决定增加或减少抓握力。在机器人传感器技术中,滑觉发展较晚,当今急需解决的问题是快速检测滑动,并调整抓握力,以免损坏被抓物体。

若被抓物体滑动(抓握不恰当),感知滑动的最简单方法是“抓举尝试技术”,如图 7.1 所示。机器人的特殊关节(或一组关节)的电机电流作为物体是否滑动的量度,电流监控可以是数字



(a) 抓爪用最小抓爪力( $t=t_0$ ); (b) 由于力小而未能抓起部件, 抓爪离开后关节电机电流无变化; (c) 抓爪再次下降, 力增大; (d) 成功地抓起部件(力足够大)。关节电机电流增大,  $t=t_0$  指出抓爪负载。

图 7.1 检测滑动的“抓握尝试技术”

式,亦可是模拟式。无论何种输出形式,抓爪首先应取向正确,其次是位于所抓物体之上,并加上一个小的抓握力。机械手试图举起物体时,负载转矩使一个或多个关节内的电动机电流增加。若未检测到电流增大,则指令机械手返回起始点。然后,通过某种预定的量增大力,并使机器人“再尝试”。重复程序直到监控电流

增加，从而使部件不滑动。

采用上述技术存在的问题，第一，虽已将部件抓起，但机械手移动时它还会从抓爪中滑出，这说明上述程序不再检测滑动。第二，若抓握脆性部件，为了避免压碎部件，抓握力应减至到最小。若抓握重而坚固的部件，则初始力可大一些。若抓握混合物或事先未知的部件，则可能损伤其中一些物品，或抓不到欲抓物品。第三，必须避免电流高于抓握所需“阈值”时电刷噪声造成的脉冲，用无刷电机可避免这一问题，但会增大成本。

除上述抓握和尝试程序外，根据光学、磁学和导电敏感技术已研制成许多实验器件，下面简述几种滑觉传感器。

### 7.1 受迫振荡滑觉传感器

受迫振荡滑觉传感器的工作原理如图 7.2 所示。受迫振荡导致的电压脉冲使部件跟抓爪表面成切线方向(跟抓爪力垂直)移动。该方法跟留声机唱片上记录放音信息的方法极相似。

图中蓝宝石指针伸出传感器表面，并跟被抓物体接触。若部件滑动，则指针移动，于是压电晶体产生机械形变，用阈值检测器能敏感到所产生的合成电压脉冲。抓爪力增量性地增加直到部件停止滑动。

这类滑觉传感器存在许多问题。最大的问

题是尽管橡胶阻尼器使传感器对非滑动敏感较少，但传感器仍对

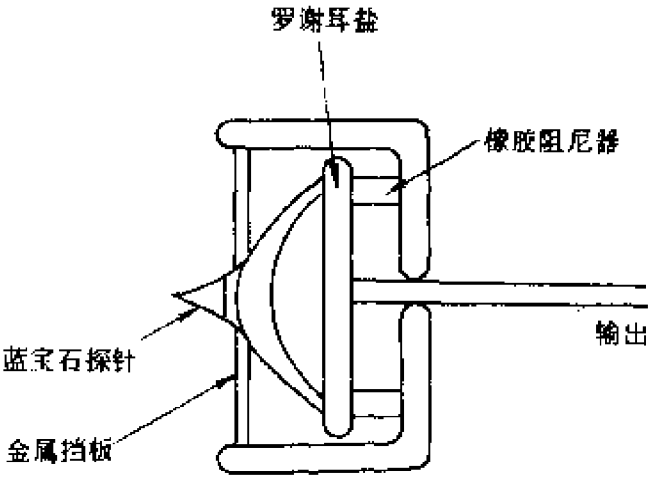


图 7.2 用蓝宝石指针和压电晶体产生受迫振荡的滑觉传感器

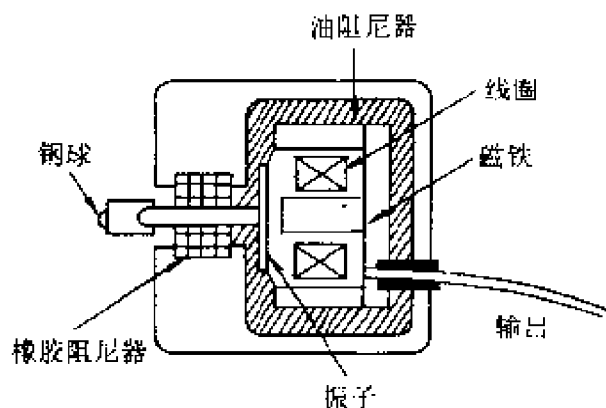


图 7.3 改进后的变道振荡滑觉传感器

图 7.3 示出改进后的滑觉传感器。蓝宝石指针用一个坚固的  $\phi 0.5\text{mm}$  钢球代替，有脆性的压电晶体用永磁线圈代替。因此，部件沿着抓爪的任何运动都会引起线圈的机械位移，从而输出电压。此外，使用橡胶和油两种阻尼器以及阈电路还降低了传感器对机械手振动的敏感。

## 7.2 断续器型滑觉传感器

日本名古屋大学在光学(或磁学)编码器(或断续器)基础上研制成断续器型滑觉传感器。图 7.4 示出磁滚轮型滑觉传感器，其由伸出传感器的橡胶滚轮和一个小的永久磁铁构成。部件在抓爪中的滑动能使滚轮转动。永久磁铁在磁头(可采用磁带录相机用的磁头)上方经过时产生一个脉冲，从而增大抓爪力。

上述传感器的主要缺点是

• 140 •

机器人机械手本身的机械振动起反应。这类检测器必须精确地敏感到部件开始的滑动，这就需要尽可能地降低对非滑动的敏感。另一明显的缺点是为了检测滑动，指针必须碰着部件表面，这样容易磨损指针，要求定期更换指针。若快速减

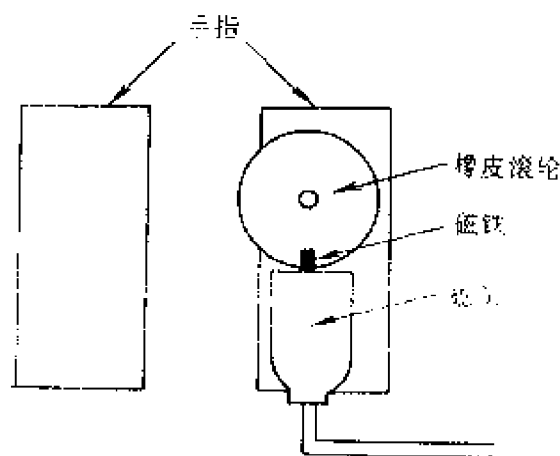


图 7.4 磁滚轮型滑觉传感器

滑动分辨率差。由图 7.4 可见,若传感器不是处于复原位置,则检测滑动仅需要作很小的转动。开始处于复原位置,在转动开始时就能立即检测滑动。但进一步敏感滑动要等到其他滚轮转动。

提高分辨率的办法是使用多个磁体而不是一个磁体。磁体可用多个小片铁磁材料,并将它们对称地埋置在橡胶滚轮周围。读出头由简单的直流线圈构成。这样,只要很小的转动,部件滑动就能使磁阻变化。这种传感器能敏感连续滑动。

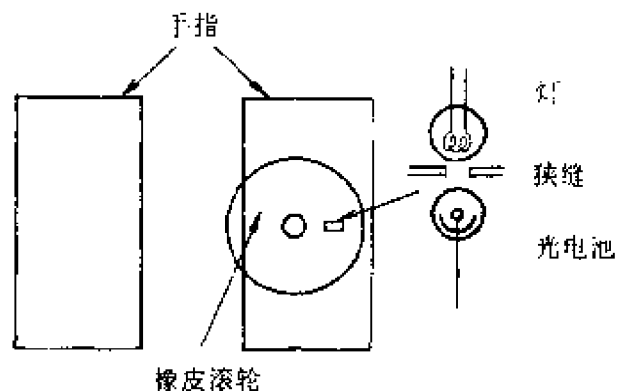


图 7.5 光学断续器型滑觉传感器

图 7.5 示出光学断续型滑觉传感器。在这种传感器的上述橡胶滚轮中安置一个小裂缝。用光发射检测器检测部件运动。这类传感器跟上述传感器一样分辨率不高。提高分辨率办法是在滚轮上设置更多的裂缝。

### 7.3 滑觉敏感“指”

图 7.6 示出用压力传感器代替神经细胞模拟人手检测滑动的装置。发生滑动时伸长的指针使硬橡胶片变形,标准压力传感器检测压力变化,所产生的电信号可用于提高抓爪力,一直到部件被稳定地抓握在抓爪手指里。

上述设计的问题是增加抓爪力使滑动停止的动作本身亦产生压力变化,这种变化可解释为附加“滑动”。因为滑动响应信号的频率含量不同于抓爪力增加时产生的频率,故采用适当的信号处理技术能消除这一问题。图 7.7 示出的机械装置用现有技术制作的这类压力传感器不可能获得人手感受器的密度。弥补办法是在小

表面内设置大量滑觉敏感位置,在制作业中一般需要敏感位置少,故对工业机器人不是大问题。

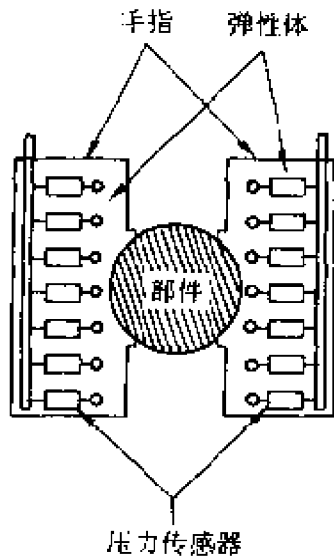


图 7.6 人手指的工程模型

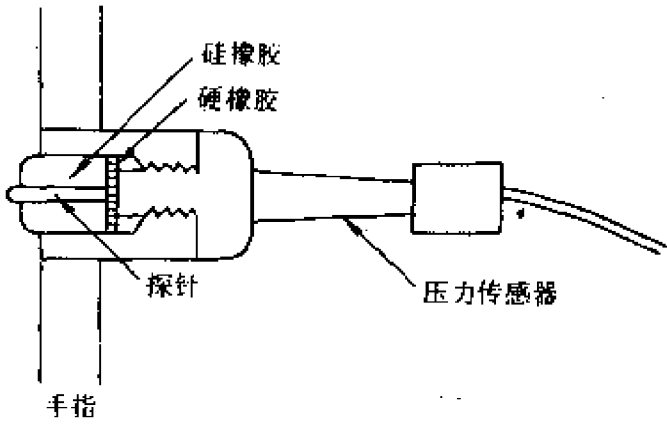


图 7.7 检测滑动的指针式压力传感器

## 7.4 贝尔格莱德手掌滑觉传感器

南斯拉夫的科学工作者利用受迫振荡技术产生用于敏感滑动的电信号。他们研制成的第一种传感器如图 7.8 所示。物体在手的皮肤上滑动时,略微伸出表面的压花滚轮旋转,导致簧片朝接地的接点振动。这种动作在方波  $R$  中产生脉冲宽度调制,从而产生总信号  $e_{out}$ , 频宽比小于 50% 的非零输出均表明发生滑动。

这种传感器难于小型化,并且反应角受限制(滑动力在滚轮平面上起作用),仅能在一个方向敏感滑动。

图 7.9 示出压花滚轮用指针代替的滑觉传感器,沿手表面滑动的物体使指针朝着传感器部件形成的接地接点振动。载频方波再一次产生脉冲宽度调制。除了上述传感器的问题外,这种器件仅在抓爪力较小时才工作(力大时指针闭锁,从而阻止机械振动)。

第三种滑觉传感器克服了上述两种传感器的问题,如图 7.10 所示。由图可见,滚轮和指针都用一个非导电小球代替,这种小球

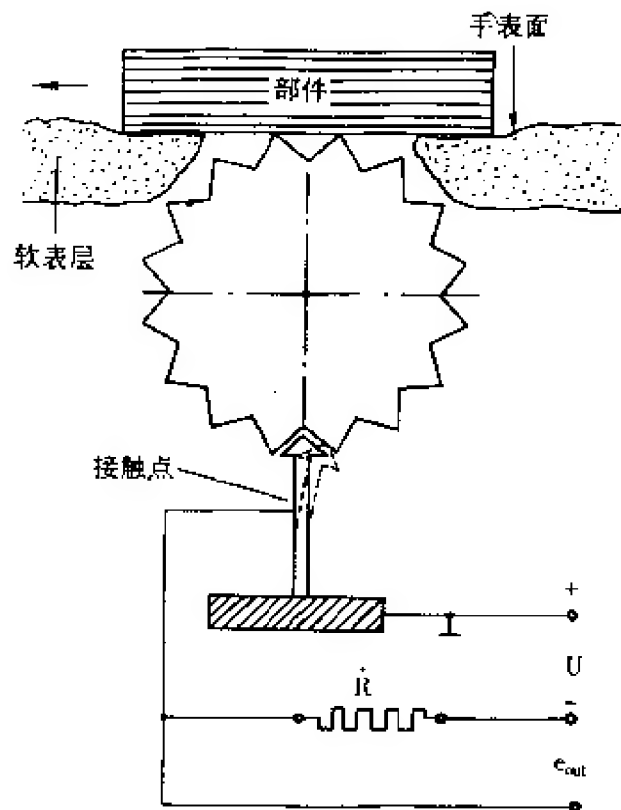


图 7.8 第一种贝尔格莱德手滑觉传感器

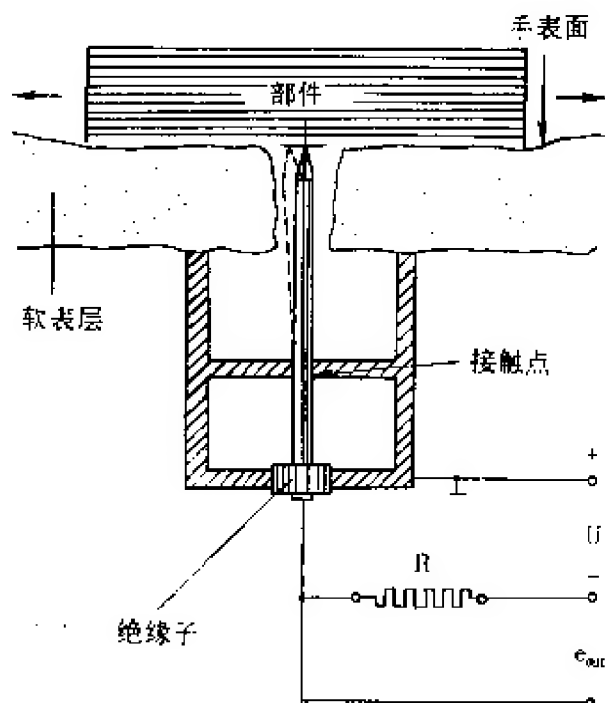


图 7.9 第二种贝尔格莱德手滑觉传感器

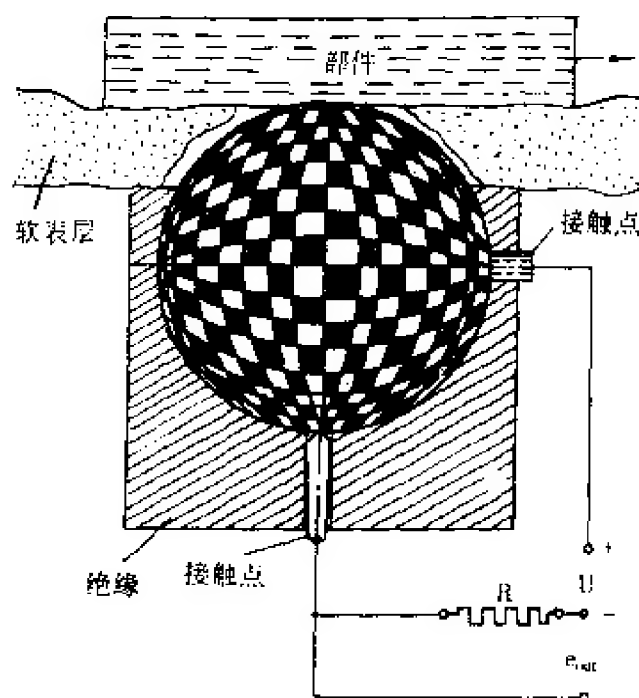


图 7.10 第三种贝尔格莱德手滑觉传感器

可在任意方向旋转,球表面是用导体和绝缘体配置的网眼。监控两个接点末端的电压差便可检测滑动。一旦物体滑动,则产生脉冲宽度调制信号。

和前两种传感器相比,这种传感器可在任意方向敏感滑动,对外部振动敏感小,且容易使球小型化,因而增加了装置检测小球线方向运动的能力。这种传感器安装在贝尔格莱德手上,并构成伺服系统,可用于机器人,但仍需进一步改进。



## 第八章 热觉传感器

钢和木头都置于室温下,但我们感觉钢比木头冷。这种明显的差别是由于钢能更快地将热量从手指传走。工厂办公室和家中的机器人装有利用这种现象的热觉传感器能识别物体,从而实现自治。

### 8.1 热觉传感器的设计

机器人热觉传感器可仿照人的热觉敏感进行设计。皮肤覆盖的毛细管血液循环系统使皮肤温度保持恒定并高于环境温度,利用皮肤的这一特性可鉴别接触物体的热性能。

热觉传感器的结构如图 8.1 所示,它由三部分组成。一是就象人的血液使皮肤变暖一样,热觉传感器有一个温度稳定的加热器,它通过热敏电阻  $TH_2$  作电路反馈元件使温度稳定。二是在未知物体与加热器之间有一层热导率已知的薄膜材料(耦合层),其将热量耦合到未知物体接触处的热敏传感器  $TH_1$ 。

晶体管的耗散功率提供传感器的热源,珠状热敏电阻  $TH_2$  跟晶体管热巢接触,加热电路使热巢温度稳定在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  内。若使热源温度为  $65^\circ\text{C}$ ,则表面温度约  $46^\circ\text{C}$ (确切温度与环境温度有关)。热源温度高可提高灵敏度,但应避免热源损坏待检测物体。热源与未知物体的耦合层是 3mm 厚的硅橡胶,橡胶弹性能使不平表面有好的接触。热敏电阻  $TH_1$  设置在硅橡胶的外表面,它测量由于热流流入被抓物体而引起的温降。该热敏电阻两端的电压放大后即是传感器的输出。 $TH_1$  和  $TH_2$  热敏电阻均可用 PHILIPS 型 2332 6340 1152,他们在  $25^\circ\text{C}$  的电阻值为  $1500\Omega$ 。

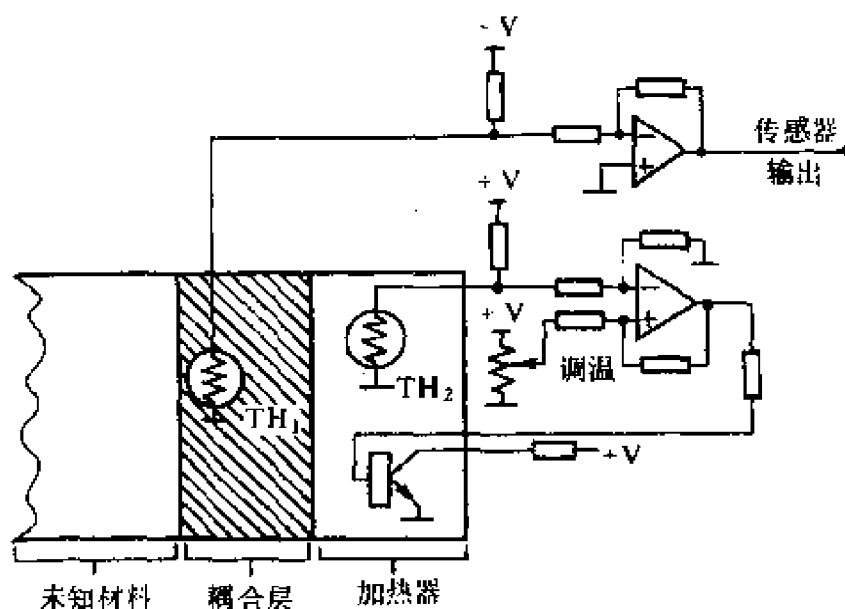


图 8.1 热敏传感器的结构示意图

由传感器的输出可确定未知物体的热传导系数  $k$  和热扩散率  $\alpha$ 。热扩散率  $\alpha$  等于热传导系数  $k$  除以密度  $\rho$  和比热  $C$  之积。但应注意，物体的形状和厚度对传感器输出有影响。

## 8.2 热觉传感器的数学模型

假定传感器的宽度远小于其横切面。我们用一阶模型模拟跟物体接触的传感器的瞬态热响应，如图 8.2 所示，将传感器视为长  $l_1$ 、热传导系数  $k_1$  和热扩散率  $\alpha_1$  的均匀材料块，左边的温度由温度为  $T_1$  的热源确定，传感器未跟物体接触时，在表面  $z=l_1$  处的温度为  $T_s$ 。在  $T=0$  时，传感器跟一个长  $l_2$ 、热传导系数  $k_2$  和热扩散率  $\alpha_2$  的均匀物体接触。整个物体的初始温度为  $T_0$ （环境温度），假设接触表面不存在热阻。机器人金属抓手由右侧抓取物体，假设物体右侧保持在环境温度。时间相关热扩散方程解的标准形式：

$$T_1(z, t) = (ss)_1 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n C_n \sin(S_{n1} z) e^{-\int_0^t \alpha_1 d\tau}, \quad 0 < z < l_1 \quad (8.1)$$

$$T_2(z, t) = (ss)_2 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n C_n \sin(S_{n2}(l_1 + l_2 - z)) e^{-\int_{t_0}^t \alpha_2^2 dt},$$

$$l_1 \leq z \leq (l_1 + l_2) \quad (8.2)$$

式中  $(ss)_1$  和  $(ss)_2$  分别是传感器和物体的稳态解, 如图 8.2(c) 所示。  $A_n$ 、 $C_n$ 、 $S_{n1}$  和  $S_{n2}$  是由边界和初始条件确定的量。

因为接触表面  $z=l_1$  两侧的温度相等, 故对于所有整数  $n$

$$S_{n2} \sqrt{\alpha_2} = S_{n1} \sqrt{\alpha_1} \quad (8.3)$$

并且

$$C_n = \frac{\sin(S_{n1}l_1)}{\sin(S_{n2}l_2)} \quad (8.4)$$

由同一界面两侧连续热流量使得

$$C_n = - \left( \frac{K_1}{K_2} \right) \sqrt{\alpha_2/\alpha_1} \frac{\cos(S_{n1}l_1)}{\cos(S_{n2}l_2)} \quad (8.5)$$

方程(8.4)和(8.5)联合构成超越方程, 其跟方程(8.3) 结合可解出任意空间谐波  $n=1$  开始的  $S_{n1}$  或  $S_{n2}$ 。

最后一个条件是如图 8.2(b) 所示的初始条件。两种材料的超越方程的解是准正交函数, 应用加权特征值方法可得

$$\frac{S_{n2}A_n}{4} = \frac{E_1(\sin(S_{n1}l_1) - (S_{n1}l_1)\cos(S_{n1}l_1)) + (k_2/k_1)E_2C_n(\sin(S_{n2}l_2) - (S_{n2}l_2)\cos(S_{n2}l_2))}{\sqrt{\alpha_2/\alpha_1}(2S_{n1}l_1 - \sin(2S_{n1}l_1)) + (k_2/k_1)C_n^2(2S_{n2}l_2 - \sin(2S_{n2}l_2))} \quad (8.6)$$

式中

$$E_1 = \frac{T_s - T_1}{l_1} + \frac{(T_1 - T_0)}{l_1 + (k_1/k_2)l_2}; \quad E_2 = \frac{k_1}{k_2} \frac{(T_0 - T_1)}{l_1 + (k_1/k_2)l_2}$$

写出计算机程序, 以便确定通过传感器和物体的随时间变化的温度曲线。给出参数  $T_s$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $l_1$ 、 $l_2$ 、 $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ , 即可解出关于空间谐波  $S_{n1}$  的超越方程(8.4)和(8.5)的解, 一般  $S_{n1}$  开始从  $n=1$  到  $n=50$ 。每一空间谐波系数  $C_n$  和  $A_n$  由(8.5)和(8.6) 确定, 这样即可获得(8.1)和(8.2)的完全解。

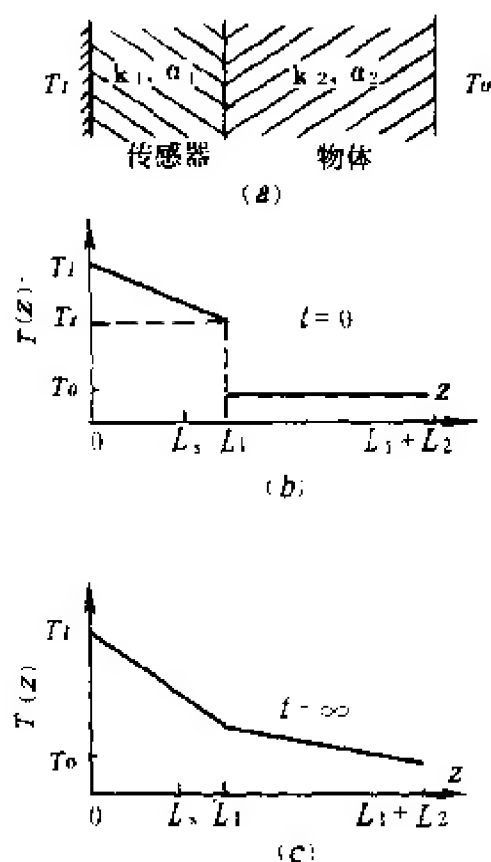


图 8.2 (a) 传感器和物体的一维模型; (b) 初始温度分布;  
(c) 最终温度分布

### 8.3 热觉传感器识别物体的 热扩散率和热传导率

安装热觉传感器的机器人手爪能识别物体的热扩散率和热传导率。图 8.3、图 8.4 和图 8.5 分别给出铝、玻璃和蜡的传感器响应,除记录的传感器输出外,图中还给出理论计算值。试验样品为  $3 \times 3 \times 1.2\text{cm}$ 。传感器的热敏电阻位于接触表面之下  $z=l$  ( $l < l_1$ ) 处。图中分别给出三种接触材料在检测器处温度随时间变化的计算值。检测器的初始温度是

$$T(l, 0) = T_1 - (T_1 - T_0) \frac{l_s}{l_1}$$

稳态时是

$$T(l, \infty) = T_1 - \frac{(T_1 - T_0)l_1}{\left(l_1 + \frac{k_1 l_2}{k_2}\right)}$$

比较各种物体的曲线可知, 计算值跟测量值基本一致。对于铝, 检测器温度单调下降, 而对于玻璃, 检测器温度快速下降至稳态值以下, 然后稍向稳态值回升。石蜡的结果跟铝和玻璃完全不同, 但仍可通过数学模型来解释。因为石蜡的热传导率很低, 它起到传感器和外部环境的绝缘作用, 因此, 接触面温度向稳态值逐渐升高。初始时传感器温度下降是因为石蜡的热量引起的。在理论上, 温度分布由位置谐波的和构成, 每个谐波都有自己的衰减时间常数, 其中基波的衰减时间常数最长。因此, 若放大倍数  $A_1$  ( $n=1$  时, 式 8.4 给出) 为正, 检测器上的温度由上逐渐接近稳态,  $A_1$  为负时, 由下接近稳态,  $A_1$  的符号由  $k_2$ 、 $d_1$  和  $l_2$  确定, 但无论那种情况, 稳态附近的时间常数

$$\tau = \frac{1}{(\alpha_1 S_{11}^2)} = \frac{1}{(\alpha_2 S_{12}^2)}$$

因此, 测量  $\tau$  值能估计出物体热扩散率, 而测量稳态温度可确定物体的热传导率。通过机器人控制处理器的算法可完成两种测量的计算。

## 8.4 热觉传感器分类材料

对于不同热传导率和热扩散率的材料, 传感器能给出独特的随时间变化的响应。图 8.6 示出用热觉传感器识别四种材料的曲线, 图中给出开始记录 5s 和 20s 后除去记录的传感器温度变化与时间的关系。这些试验结果跟我们的经验一致。我们感觉铝冷跟曲线所示的温度大幅度下降相对应, 感觉石蜡、软木和聚苯乙烯泡沫逐渐变冷跟曲线所示的温度小的下降相对应。聚苯乙烯泡沫跟

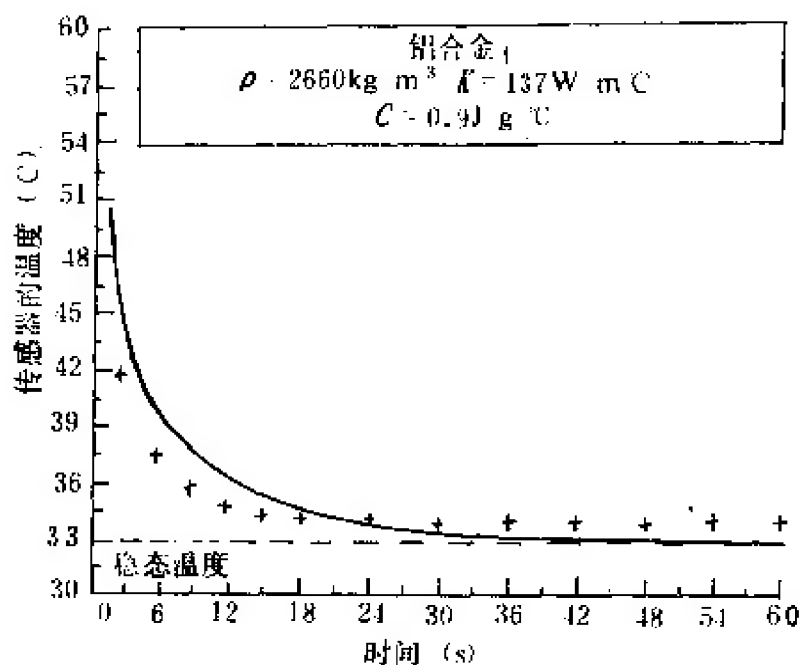


图 8.3 铝 ( $\rho = 2660 \text{ kg/m}^3$ )

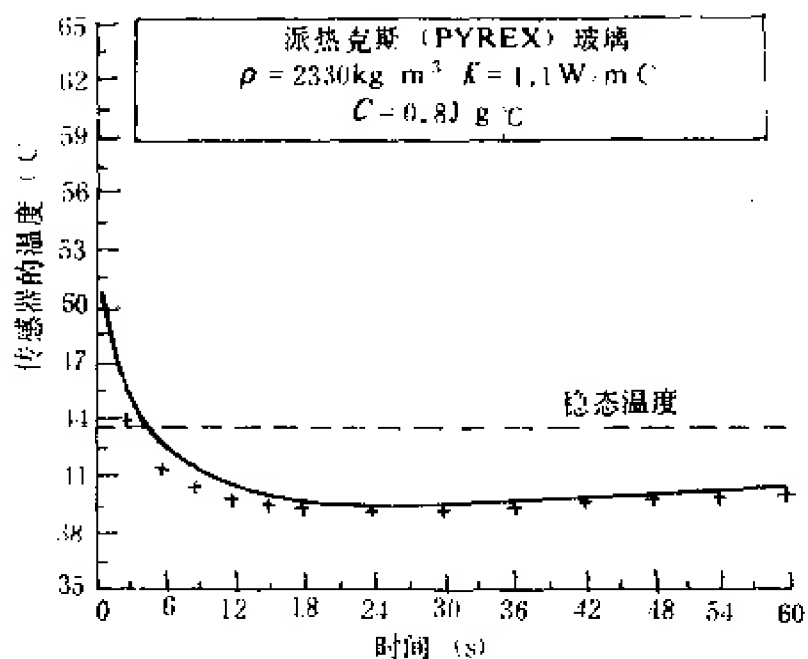
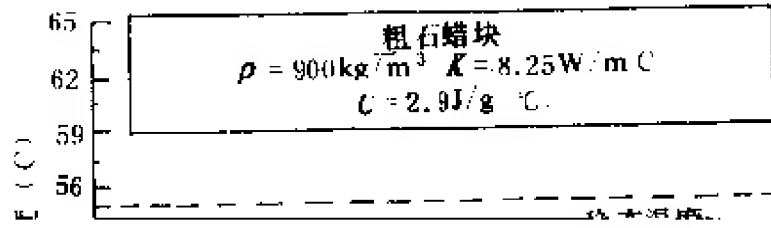


图 8.4 玻璃的传感器响应

传感器接触一个短时间后，传感器的温度上升到它在空气中的值以上，这说明聚苯乙烯泡沫是一种良好的绝缘体。

每种材料跟传感器接触 1~2s 后，传感器的输出响应明显不



$$D = \frac{T_i - T_e}{T_i - T_a} \times 100 \quad (8.7)$$

传感器温度向环境温度下降的百分率温度可用于根据预先记录的材料范围分类未知材料。图 8.7 记录了铝、玻璃、蜡、有机玻璃、木头和软木样品的 D 值。因此，根据具有最接近 D 值的已知材料即可分类未知材料。

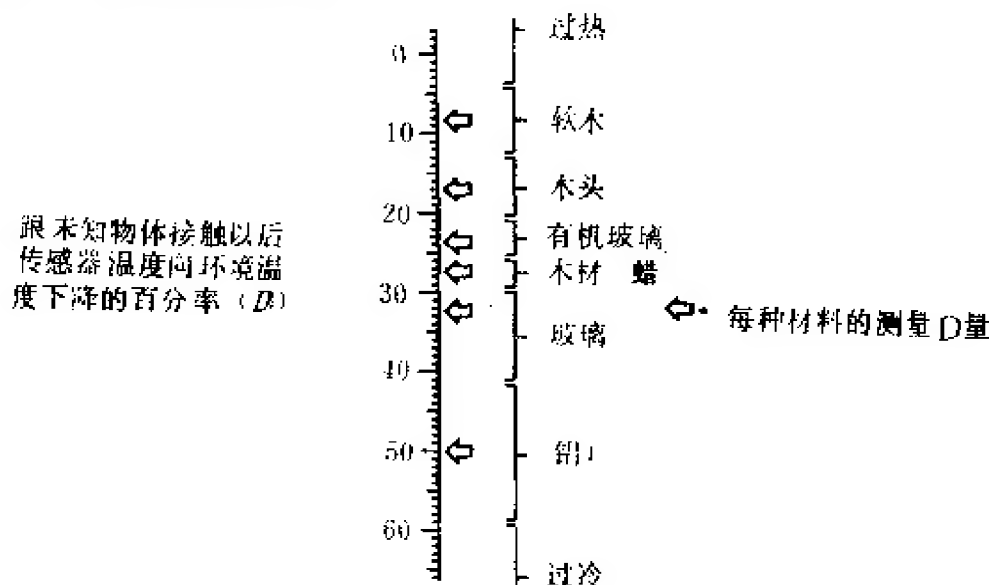


图 8.7 预先记录的一些材料的 D 值

## 8.5 阵列式热觉传感器

前述一维热觉传感器可扩展成二维阵列，这种传感器的截面如图 8.8 所示。阵列式热觉传感器能显示物体的形状和材料的图像，如图 8.9 所示。因为传感器两面有热传导，故图像边缘不十分严格。

## 8.6 水下热觉传感器

本章前几节论述的空气中识别物体材质的热觉传感器通过恒温电路给热敏元件加热，因为水的导热率高于空气的导热率，故它



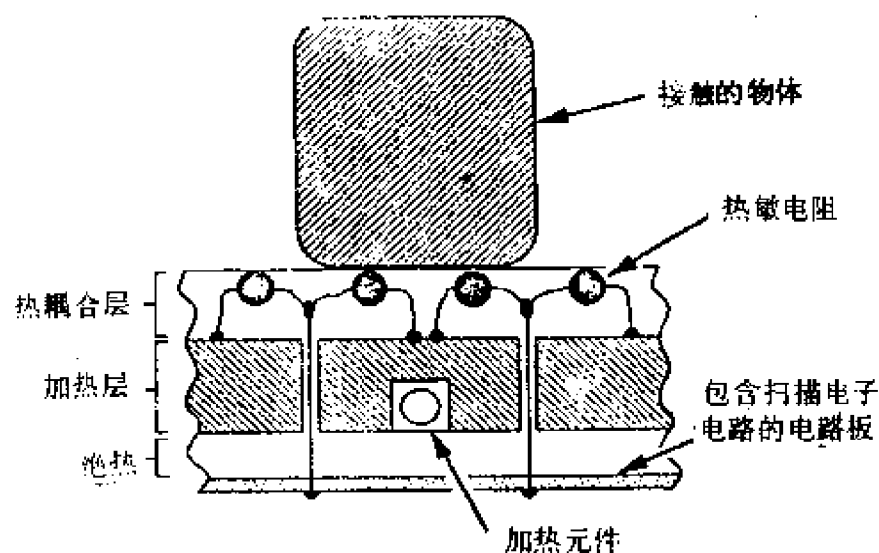
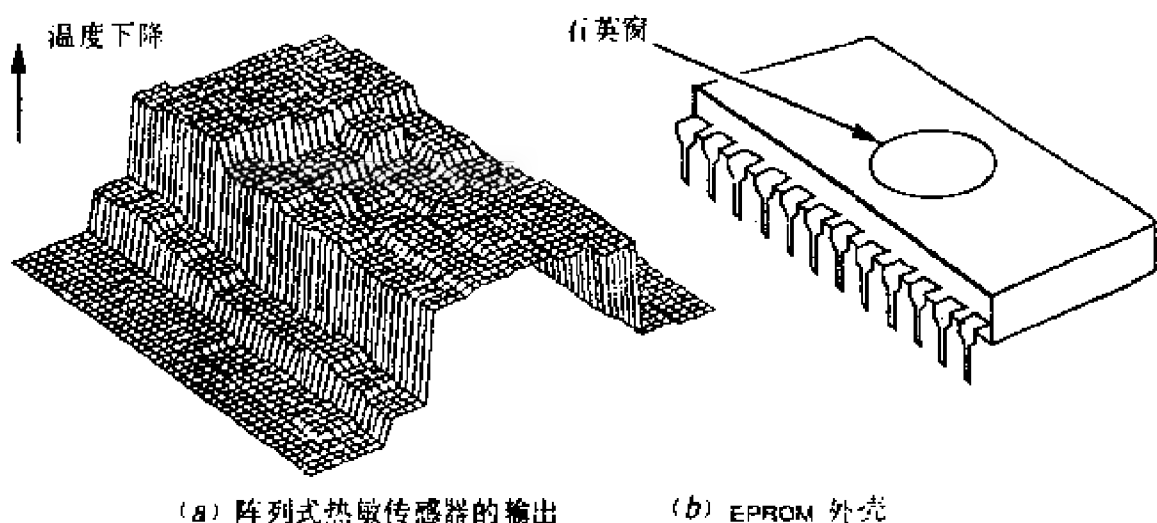


图 8.8 阵列热觉传感器截面图



(a) 阵列式热敏传感器的输出

(b) EPROM 外壳

图 8.9 跟 EPROM 外壳接触的阵列式热觉传感器输出

(陶瓷 EPROM 外壳导热性好,而位于中心的石英窗导热率低)

在水中不能恒温,难于在水中识别物体。

本节论述张福学和李擎等发明的水下热觉传感器的结构原理及其识别水下物体的方法<sup>[24~26]</sup>。

### 8.6.1 水下热觉传感器的结构原理

图 8.10 是水下热觉传感器的热敏元件及其电路示意图。图中

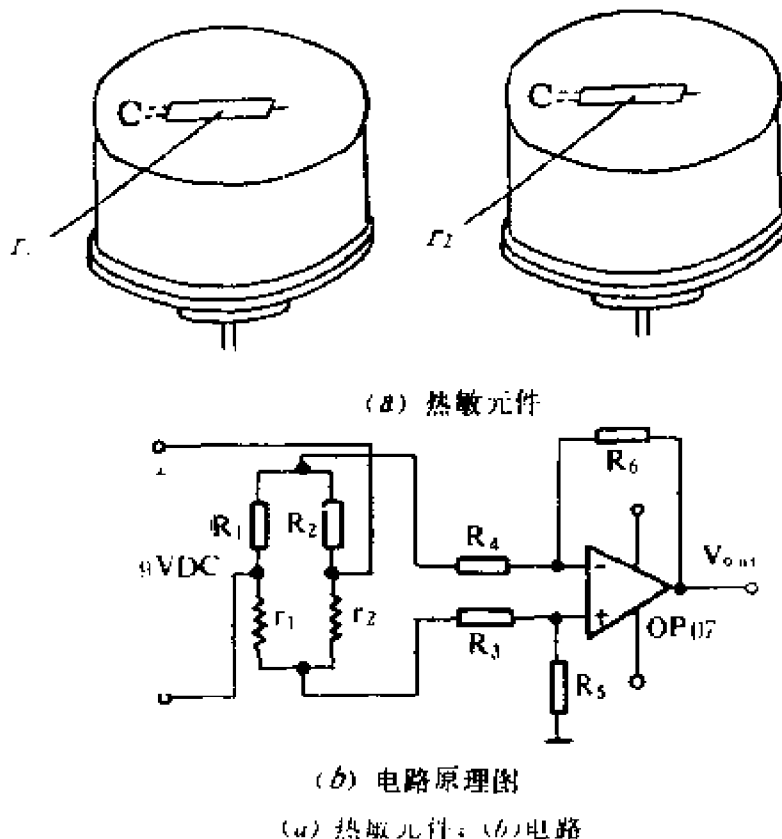


图 8.10 水下热觉传感器的结构示意图

$r_1$  是用作识别物体的热敏元件,它接触水中物体表面。 $r_2$  是用作检测环境温度的热敏元件,它悬于水中。传感器通电工作时,电源使标称阻值相同的热敏元件  $r_1$ 、 $r_2$  的温度均高于水环境温度。但所接触的物体将  $r_1$  的热量带走,导致  $r_1$  的温度不同于  $r_2$  的温度,从而使  $r_1$ 、 $r_2$  的电阻值不同,故电桥失去平衡,输出一个与  $r_1$  的阻值变化成比例的模拟电压。因为不同的物体导致不同的模拟电压输出,故根据输出电压的大小即可区分出不同材质的物体。

试验表明,为了提高识别率,应避免水很快带走热敏元件的热量。解决这一问题的有效方法是所设计的传感器电路应在热敏元件接触物体后才通电工作。

## 8.6.2 水下各种物体的热响应

### (1) 热响应

图 8.10 所示热觉传感器能识别水下十多种物体,其中识别率

大于 $>90\%$ 的物体有钢、覆铜板、大理石、油石、陶器、玻璃、皮革、胶木、塑料、泡沫塑料等十种,它们的典型热响应曲线如图 8.11 所示。

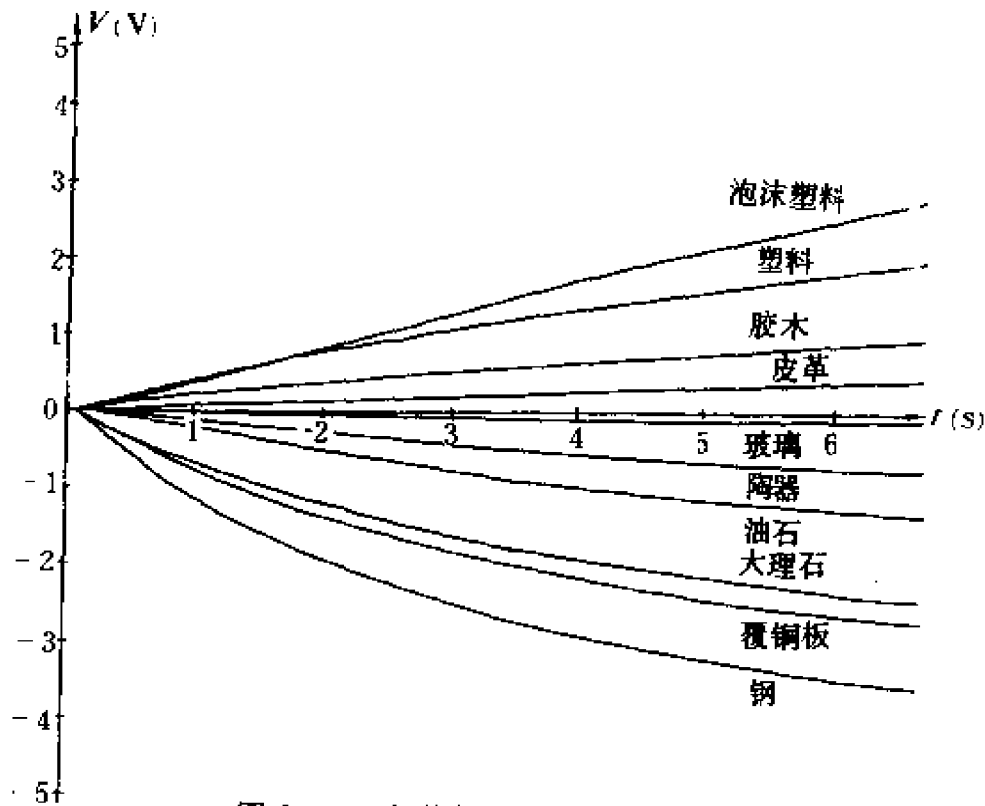


图 8.11 各种物体的热响应曲线

(2)物体的分类表

传感器的热敏元件接触物体时,其电路即输出一个表征所接触物体传热性能的的特征电压,将各种物体的特征电压范围按大小列成的图表即是物体的分类表。表 8.1 列出水环境温度为  $25\sim 30^{\circ}\text{C}$  时,实验得出的物体分类表。

表 8.1 水下物体分类表

水下物体	特征电压范围(DCV)	水下物体	特征电压范围(DCV)
钢	$-4.000\sim-2.730$	玻璃	$-0.300\sim-0.000$
覆铜板	$-2.650\sim-2.067$	皮革	$0.100\sim0.590$
大理石	$-2.657\sim-1.490$	胶木	$0.600\sim1.100$
油石	$-1.470\sim-0.800$	塑料	$1.200\sim1.950$
陶器	$-0.790\sim-0.360$	泡沫塑料	$2.000\sim3.800$

表 8.1 中各种物体的特征电压范围彼此不相交,因此,这些物体能被传感器区分开。

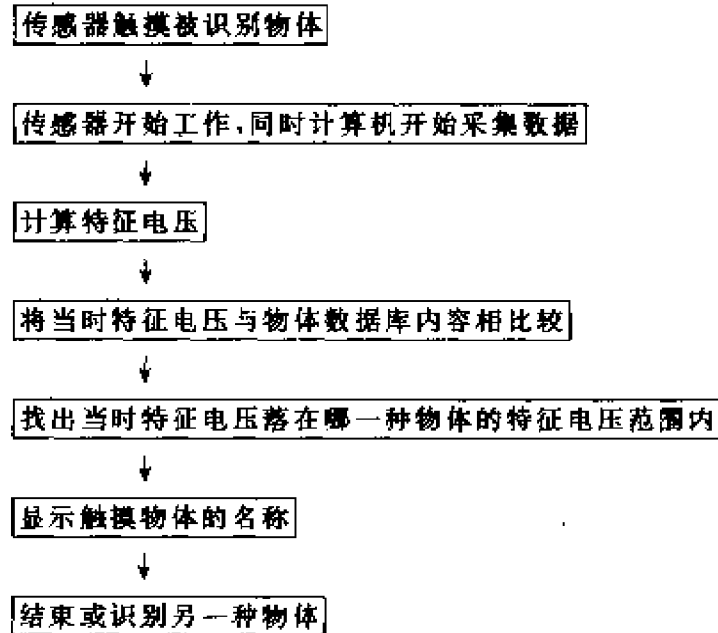
### 8.6.3 传感器-计算机在线识别水下物体系统

系统由热觉传感器、A/D 接口、486 计算机和识别软件组成。

#### (1) 系统学习过程

传感器对水下物体样本进行测试实验(对每种样本的测试实验次数不少于 25 次),由测试实验结果得出水下物体分类表,并将分类表存入系统的水下物体数据库中。

#### (2) 系统在线识别水下物体过程



热觉传感器对水下钢、覆铜板、大理石、油石、陶器、玻璃、皮革、胶木、塑料和泡沫塑料等十种物体进行识别实验。实验结果表明,大理石的识别率为 92%,覆铜板和油石的识别率为 96%,其余物体的识别率为 100%。

显然,水下热觉传感器亦可用于空气中识别物体。

## 第九章 其他模式的触觉敏感

### 9.1 纹理传感器

物体表面许多不均匀的小点构成纹理。纹理传感器作用于物体表面的方式类似于电唱机的唱针作用于唱盘。人对纹理的敏感是通过手在表面滑动,从而检测纹理。纹理传感器的截面如图 9.1 所示,其有坚硬的表面层,当传感器沿物体表面滑动时,该层产生一个振动信号[1]。这种由传感器的硬表层与物体表面纹理相互作用而产生的振动信号,由压电聚合物聚偏二氟乙烯 PVDF 检测。PVDF 膜在一个方向有最大灵敏度。因此,为了使响应均匀,用两个交叉放置的 PVDF 膜。这种传感器通过转盘以恒定速度滑过被测物体表面。分析传感器输出的频谱,即可区分出物体表面砂粒或球状物体的直径等级。

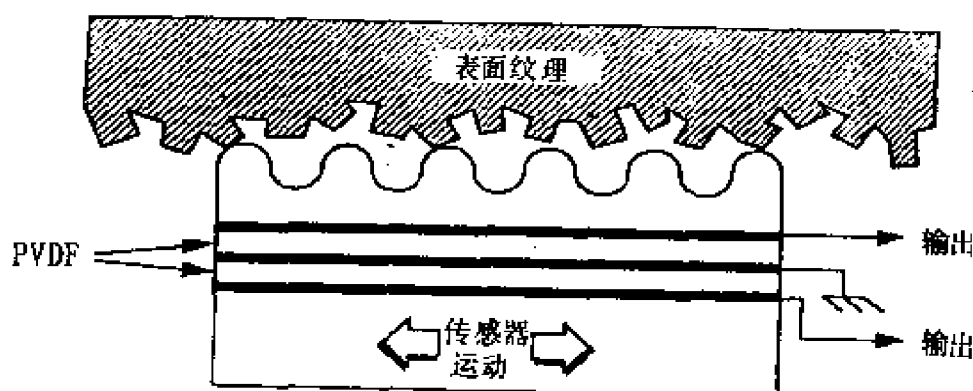


图 9.1 纹理传感器的截面图

## 9.2 电导率传感器

电导率传感器可用于监控机器人末端操纵装置与导电物体间的接触。这里介绍两种监控电接触的电导率传感器。

### 9.2.1 用电阻控制去毛刺

混合力控制器能控制铸件自动去毛刺。这种去毛刺的方法要求在控制的速率下去掉金属，但由于铸件和磨轮之间的磨损有变化，故难于获得平坦表面。解决的办法是监控接触铸件的磨轮区域的宽度。如图 9.2 所示，将一个径向导电切片装入磨轮表面。磨轮旋转时，最初磨轮和铸件间的接触区域很小，但磨掉毛刺后则接触区域增大。因此，接触区域的尺寸可用于监控后磨削过程。

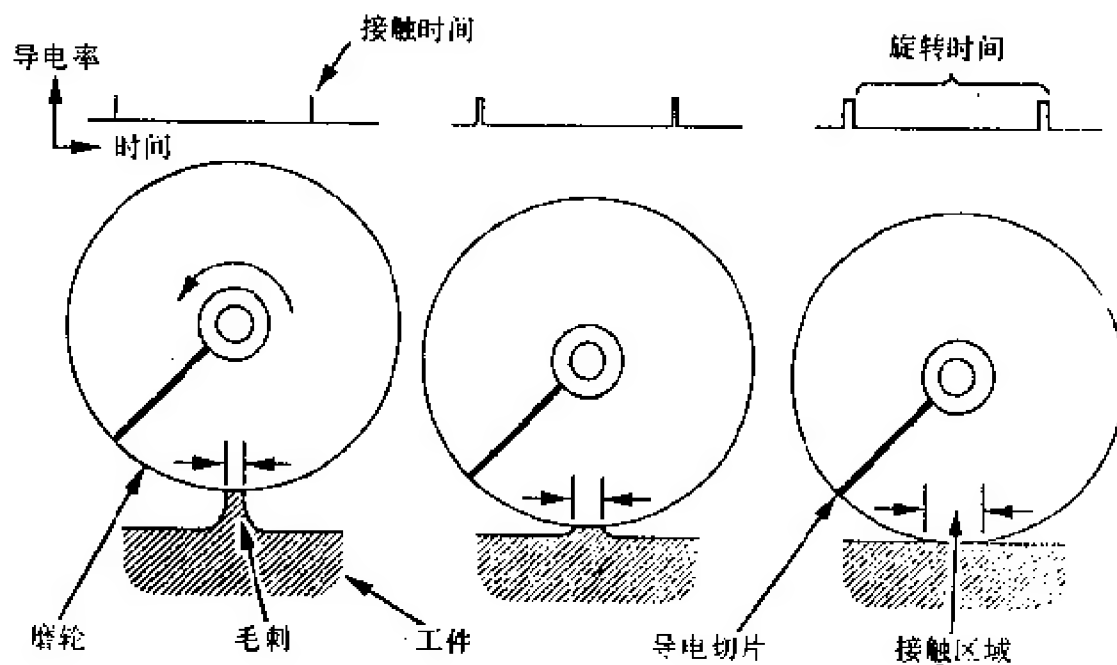


图 9.2 用电阻监控金属铸件去毛刺

### 9.2.2 自动剪羊毛的电阻接触传感器

剪羊毛过程中不可能精确预测羊的体形和姿势，因此，需要有感知羊姿势和剪毛装置的间距的传感器，如图 9.3 所示。

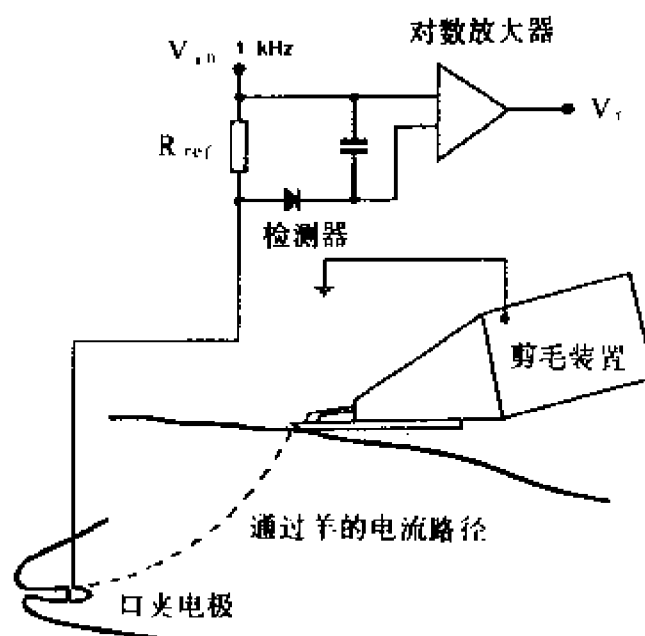


图 9.3 用接触电阻监控剪羊毛时剪毛装置的间距

接触电阻用于监控金属梳引起的羊皮肤偏转。梳接触力增大时，梳和羊皮肤间的电阻减小。羊皮肤有柔性，故可通过接触电阻估计形变。

## 9.3 通过耦合振动敏感接触

将机器人机械手的末端操纵装置产生的振动耦合到外部物体，这样即可检测接触。1983 年 Larcombe 提出了机器人固有频率的振动结构<sup>[1]</sup>。抓住物体时，物体和机器人的组合有不同的固有频率。通过监控固有频率的变化，即可知道是否抓住物体及所抓物体的质量。剪羊毛的接触敏感装置，其原理跟上述原理类似。剪毛机的振动如同锯刀前后移动。梳接触羊皮肤时，这种振动传递给

羊体，同时也传给支撑的支架。通过安装在调谐架上的加速度传感器检测支架振动。放大和滤波加速度传感器输出的信号，即可得到切割梳和羊体之间指示接触的读数。



## 第十章 触觉和机动性

对于人，手是触觉的器官，由皮肤、关节式手指和动觉构成的手能给人提供周围的信息。对于机器人，抓爪和触觉传感器是灵巧机器人操作系统不可缺少的部分。本章论述机器人手的技术条件，介绍两种灵巧手和一种灵巧抓爪。在某种意义上，灵巧手意味着：(1) 它能抓起不同形状和尺寸的物体；(2) 不需要移动机器人，手(或抓爪)就能对所抓物体的位置和取向作小的调整。

### 10.1 用于抓握的机器人手

机器人手的主要用途是抓东西，这是设计机器人手要考虑的首要问题。人们不仅要求机器人手能抓握物体，还要求它能控制物体的位置和取向。众所周知，一个无约束的物体可在独立的六个方向运动，即在三个互相垂直的方向平移和绕三个互相垂直的方向旋转。如图 10.1 所示，人们称这种物体有六个自由度(DOF)。

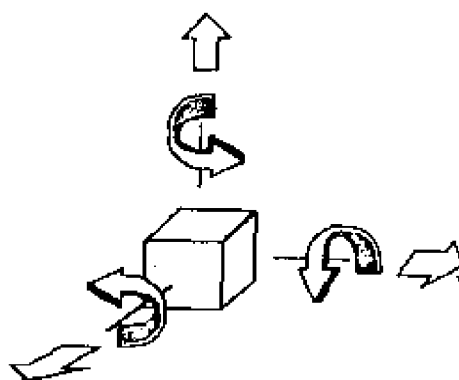


图 10.1 无约束物体的六个自由度

图 10.2 示出有点、线、面接触的运动自由度。显然，若要牢牢地抓握物体，运动自由度必须为零。若有摩擦，则运动自由度降低，因此，应使用于抓握物体的机器人手指表面有高摩擦。


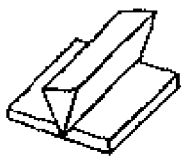

	平移方向			围绕轴旋转			总自由度 DOF	
	x	y	z	x	y	z		
	✓	✓		✓	✓	✓	5	无摩擦
				✓	✓	✓	3	摩擦
	✓	✓		✓		✓	4	无摩擦
				✓			1	摩擦
	✓	✓				✓	3	无摩擦
							0	摩擦

图 10.2 有点、线、面接触的运动自由度

## 10.2 机器人手指数的确定

根据手指必须完成的动作确定机器人所需的最少手指数。显然,不同手指数完成的动作不同。一个手指能推、滚或滑动小部件,还可用力操纵开关等。它还能跟踪物体表面,并获取触觉信息。两个手指除具有一个手指的功能外,还能抓住物体并可精确地控制物体的位置和取向。两个手指能举起小的物体,并可直接测量所举起物体的重量和重心。三个手指除能完成两个手指的功能外,它还有在手中反复抓握物体的功能,如将物体抛入空中并在新的方向抓住物体。图 10.3 示出在三个手指间连续旋转的一根指挥棒。多个手指则具有更大的灵活性,如能抓住和操纵多个物体。

手指和手掌配合抓握物体,能增加手的灵活性。例如,一个手指的手能将抓握在手指手掌间的物体举起。因此,实际上手掌起到一个手指的作用。增加抓握稳定性的办法是让手形成类似物体周围轮廓,从而使手指和抓握物体之间产生多面积接触。

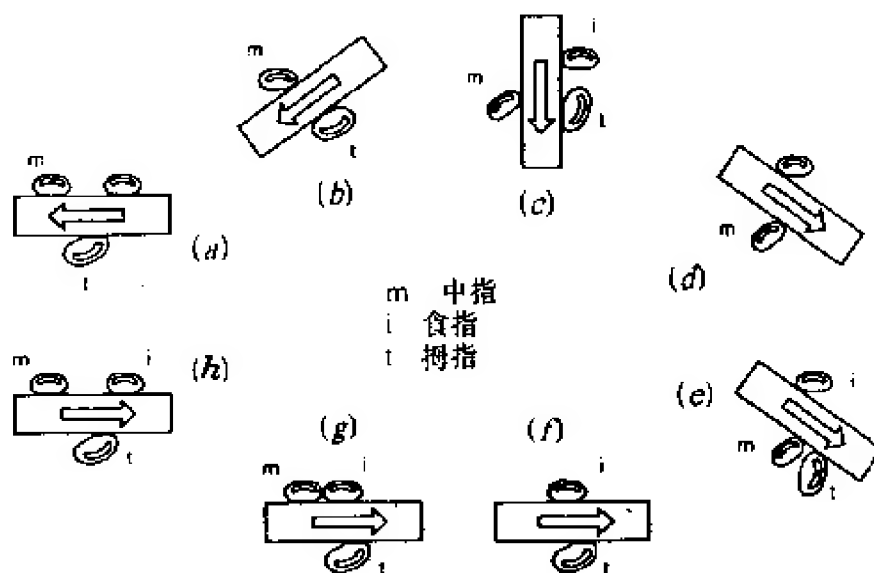


图 10.3 抓握在三个手指中的旋转指挥棒

## 10.3 人 手

抓握物体时，人手可构成许多不同的构形，人的 5 个手指有 25 个自由度，故人手不仅能抓紧物体，还能灵巧地操纵物体。图 10.4 示出用于抓握物体的人手多种构形中的三种构形。这三种构形用于抓握物体的优缺点：

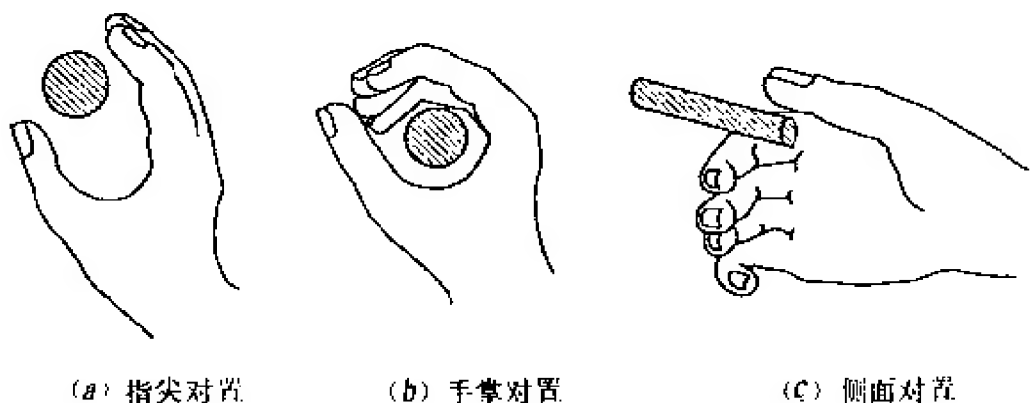


图 10.4 抓握物体的三种手的构形

### (1) 指尖对置构形

这种构形的优点是能很好地控制运动，手中的触觉传感器能

紧密接触所抓握的物体。缺点是稳定性较差，握持力不可能很大。

### (2) 手掌对置构形

这种构形的优点是稳定性好，可通过指关节获得大的握持力。缺点是适应性小，敏感度差。

### (3) 侧面对置构形

这种构形能兼顾柔性、稳定性和抓握力三者的性能要求。

改进上述抓握物体的基本构形，即可获得完成特殊任务所需要的柔性、稳定性和握持力。

外科医生发现，保持手有一定面积的皮肤感觉十分重要，否则会大大降低手的灵活性。图 10.5 示出对于抓握物体，手上皮肤触觉敏感重要程度的分布。确定机器人手上感觉皮肤的面积时应考虑上述信息。灵巧机器人手也需要触觉敏感，以便确定每个关节的位置并通过手指施加力。

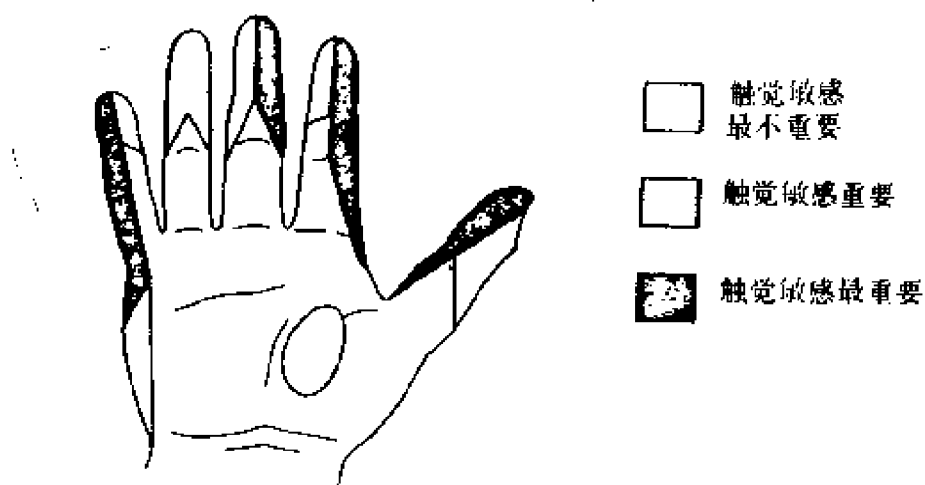


图 10.5 手的不同部位皮肤触觉敏感的重要程度分布

## 10.4 灵巧机器人手和抓爪

灵巧机器人控制器的设计必须考虑的因素：

(1) 手运动学——指数、类型，以及每个指中关节连接数、手

指的定位和每个指骨的长度，都对手(或抓爪)有影响；

(2) 关节致动器——直流电动机、气压和水压气缸、形状记忆合金和压电致动器等共同确定手(或抓爪)的速度和强度；

(3) 驱动链部件——齿轮、旋转轴、推杆、滑轮和键对手的灵活性有影响；

(4) 传感器的数量和定位对手(或抓爪)的敏感度和控制有影响。

此外，还应考虑选择用于手的支承和结构材料。

## 10.5 斯坦福灵巧手

设计斯坦福-JPL (Stanford-JPL) 灵巧手用的关节和手指最少，但它仍能为抓握物体提供六个自由度增量运动。若每个手指和物体之间具有带摩擦的点接触，则需要三个指才能完全约束抓住的物体。为了定位和取向物体，每个指尖应保持相应的位置。因为仅是点接触，故在一定限度内指尖取向不重要，每个手指仅需要三个自由度。斯坦福-JPL 手的手指在设计时使其灵巧容积最大，从而可利用手掌对向抓握物体，如图 10.6 所示。

手的每个手指的设计相同，手指的三个旋转关节由涂覆聚四氟乙烯的筋驱动。用四台伺服直流电机驱动每个手指，从而控制关节位置和拉紧筋。如图 10.7 所示，用  $n+1$  根筋驱动  $n$  个关节。在指关节的情况下，接近关节意味着靠近腕，而末端关节意味着远离腕。如图 10.7(b) 所示，末端关节由一对筋驱动。牵引/释放  $y$  和释放/牵引一个相应的筋  $z$  的长度，会导致末端关节移动，如图 10.7(c) 所示，接近关节通过牵引/释放筋  $x$  和一个等量的释放/牵引筋  $y$  和  $z$  调整。

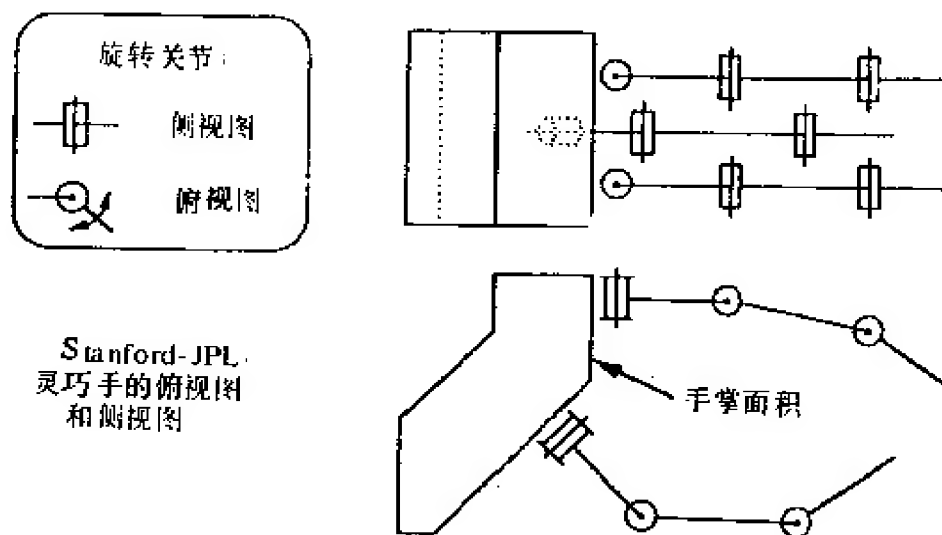


图 10.6 斯坦福-JPL 灵巧手的原理图

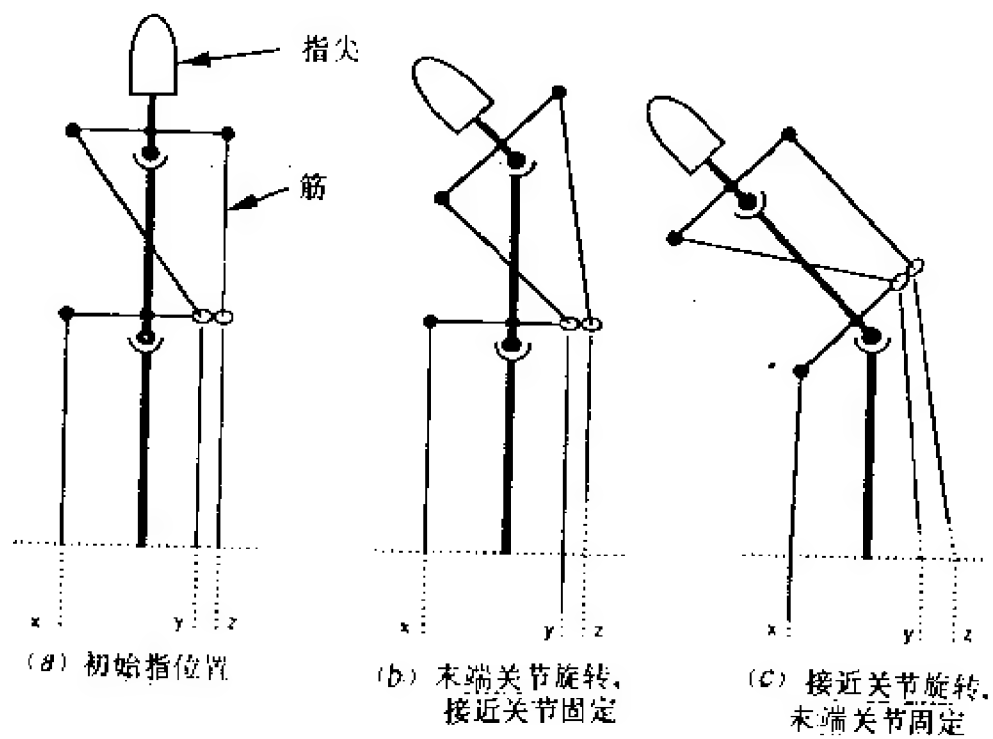


图 10.7 用  $n+1$  根筋驱动  $n$  个关节的指

## 10.6 Utah-MIT 灵巧手

Utah-MIT 灵巧手的设计严格模仿人手，故能进行复杂的操作。如图 10.8 所示，这种灵巧手可用作远距离系统中的从动装置。Utah-MIT 灵巧手省略掉小手指，拇指设置在头两个手指之间的手掌上，指关节长度跟人的手指有差别。关节由一对筋推动，而筋由气缸驱动。图 10.9 示出使用  $2n$  根筋驱动  $n$  个关节的手指。

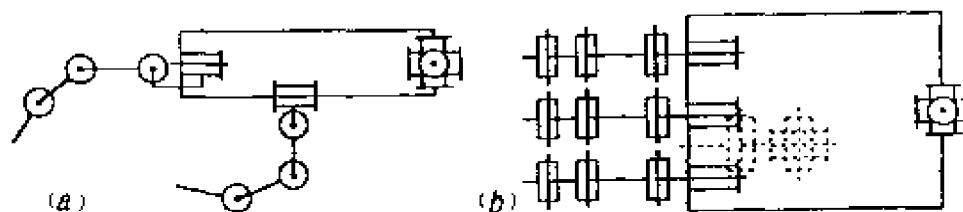


图 10.8

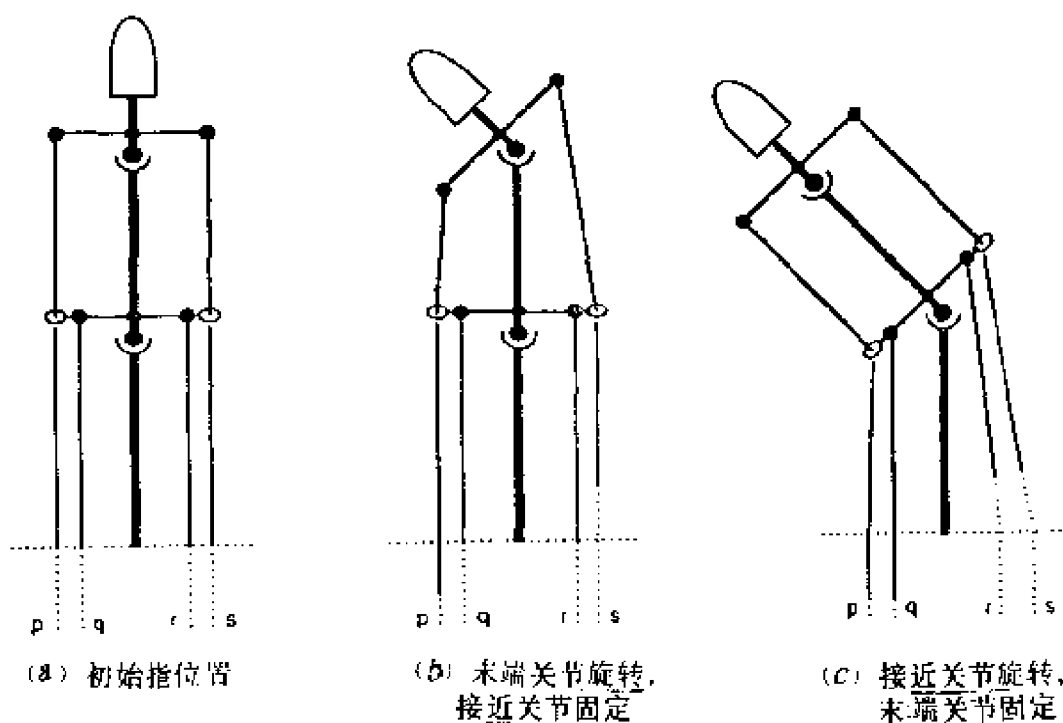


图 10.9 用  $2n$  根筋驱动  $n$  个关节的手指

灵巧手包括三个手指和一个大拇指，每个手指有四个自由度。灵巧手使用 32 个致动器，它们在指尖上能产生 31N 的抓

握力。

## 10.7 Monash 灵巧抓爪

Monash 灵巧抓爪的特点：(1) 有足够空间设置传感器；(2) 有好的电缆捷径；(3) 结构简单；(4) 能抓握宽范围的物体，且位置和取向运动增量大于 $\pm 1\text{cm}$ 和 $30^\circ$ ；(5) 容易控制；(6) 重量轻到机器人能承载。这种抓爪的结构特点如下所述。

### 10.7.1 直接驱动

Monash 灵巧抓爪的手指直接由致动器驱动。致动器设置在远处，其通过筋和电缆控制手指。如图 10.10 所示，手掌空心时才能抓握小物体。

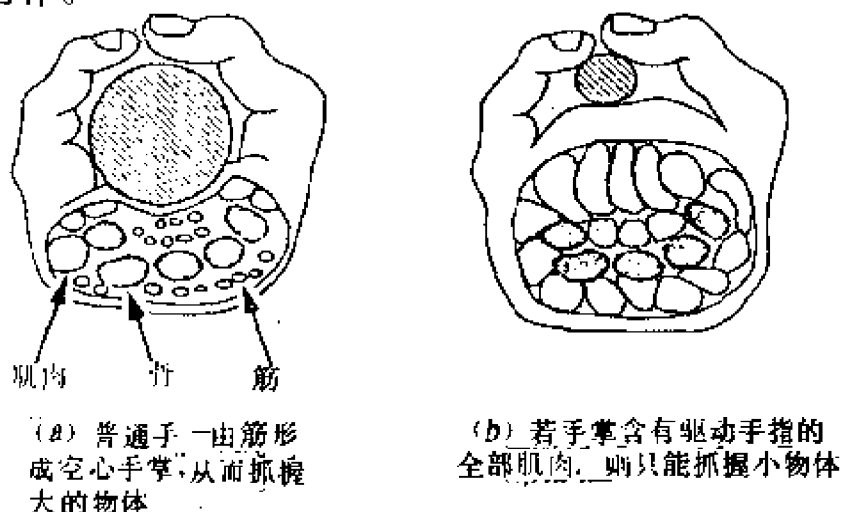


图 10.10 直接驱动手指的抓爪

### 10.7.2 并联连接“手指”

人的手指为串联连接，每个接近关节支持手指的末端部分，如图 10.11(a)所示。Monash 灵巧抓爪的全部手指关节为并联连接，如图 10.11(b)所示。

人的手指串联连接的特点：(1) 延伸较长；(2) 工作空间大；



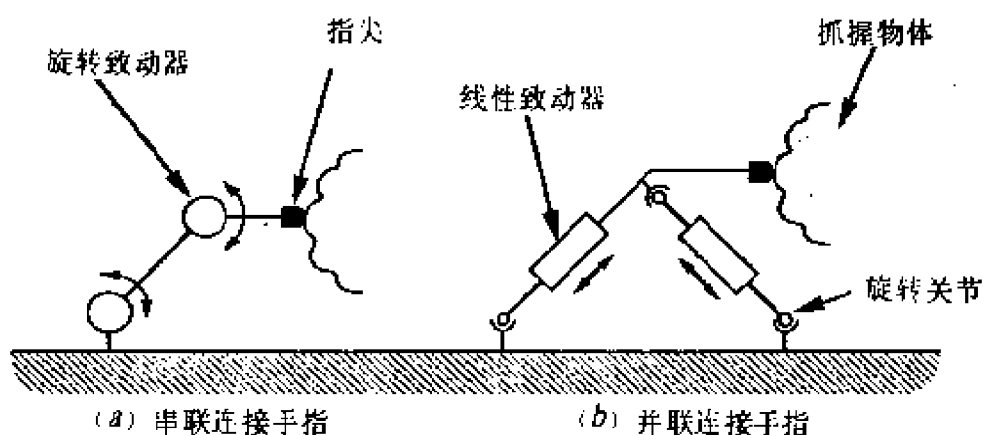


图 10.11 串联和并联连接手指的结构

(3) 每个手指能提供多个接点，故抓握稳定性好。

Monash 灵巧抓爪的手指并联的特点：(1) 坚固性好；(2) 一个致动器的误差不会传给整个结构；(3) 能跟传感器导线的大导线管结合；(4) 允许左手手指基面上安装全部致动器，并可直接连接；(5) 容易获得六个自由度的手指。

### 10.7.3 两指

Monash 抓爪仅有两个手指，每个手指有六个自由度。为了抓

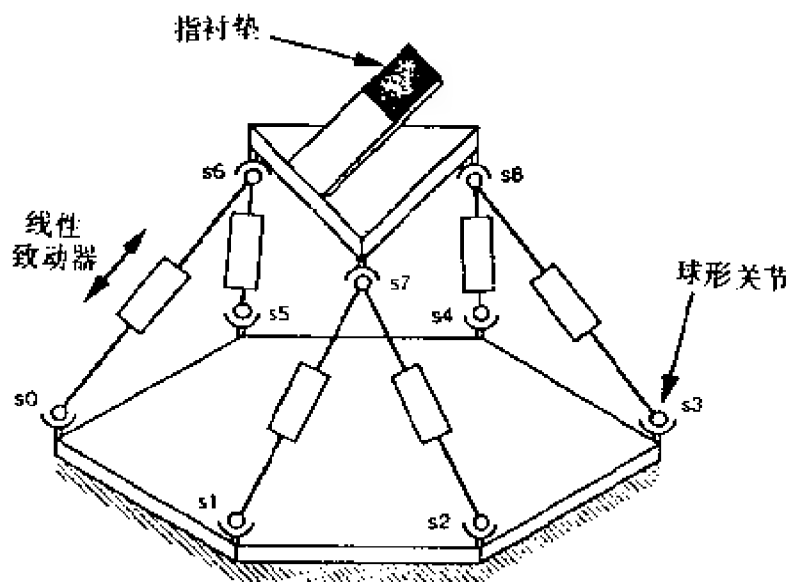


图 10.12 Monash 灵巧抓爪一个手指的结构原理

牢物体，每个手指和被抓物体之间需要有带摩擦的接触平面。在机械手的设计中，通常是将手指和被抓物体之间的接触看作运动副，因此，设手指和被抓物体之间有相对运动。用柔性指尖提供 Monash 抓爪，可望指和物体间有高度的运动耦合，从而使物体在抓爪中不动。每个指的六个自由度使被抓物体重定位而不改变指和物体间的空间关系。这样，大大地简化了对抓爪的控制。

图 10.12 示出用于飞行训练的 Monash 灵巧抓爪的一个手指的结构。这种机构允许驱动每个手指的六阶步进电动机安装在手基面上。

# 第十一章 在反射能级的触觉反馈

人体内有许多反馈环，这些环有助于人体维持稳态，除非由于较高能级抑制而过负荷。图 11.1 所示的肌肉伸展反射是这些反馈环中的一种，这种反馈环有助于维持身体姿态。肌肉的不随意延伸由神经肌肉纺锤体检测，并由输入神经细胞给脊髓发信号。若反射未被神经系统中较高能级的信号抑制，则肌肉由运动神经细胞刺激收缩，而反抗力使肌肉伸展。这种作用被低能级神经系统控制，还包含推理(或智能)的较高能级功能。

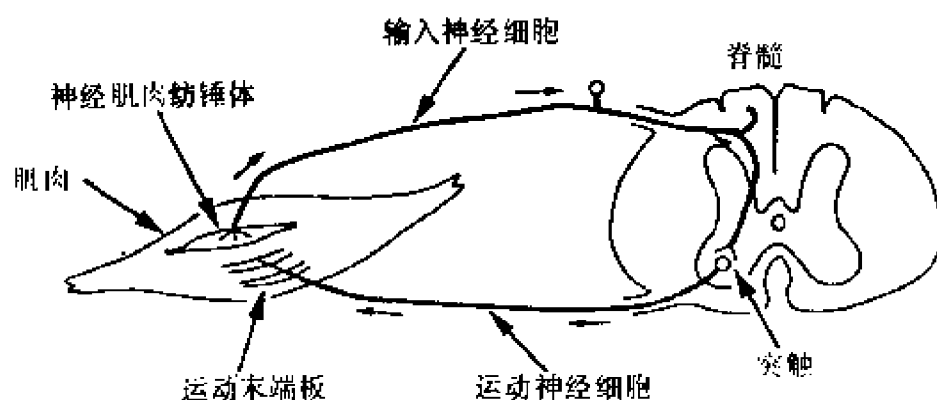


图 11.1 肌肉伸展反射

跟上述人的情况类似，机器人的作用用具有最低附加处理的传感器输出直接控制。因此，若机器人系统内使用无高级推理(或智能)的触觉反馈，它可作为反馈控制分类。例如：

(1) 使某些量维持不变。如维持剪羊毛过程中羊毛剪割机的姿态、抛光和研磨时施加的力，以及指垫上的触觉图像(检测和校准滑动)不变。

(2) 使某些量最佳。如插入或其他操作时使反作用力减至最

小,检测过高温度时移开机器人抓爪。

## 11.1 被动机械柔性

有选择性地更换机器人结构的机械柔性,能使许多跟踪和插入问题的解决公式化。选择柔性有利于装配作业、跟踪边缘和表面,以及磨削操作。

被动机械柔性的最好说明是用于装配的遥控中心柔性(RCC)机构。若一个木钉插入孔内而不失调,则说明木钉是正确地滑入孔内。横向和旋转误差使木钉塞住不动,若从背后推动木钉,则损坏木钉。若木钉能推入孔内,则木钉不会塞住不动。遥控中心柔性根据塞紧力更换木钉运动,使木钉因反作用而从前面推入孔内,而不是从背后推进孔内。这种类型的运动可通过图 11.2 和 11.3 所示的两种柔性机构获得。图 11.2 所示的平行柔性连接允许由一侧向另一侧运动,这种运动适合横向失调。柔性材料构成的连接,或将某些旋转自由度结合到柔性连接的每个末端关节上,均可获得柔性连接。图 11.3 所示的角度柔性连接允许绕木钉前头的一点旋转,它适用于木钉和孔的角度失调。

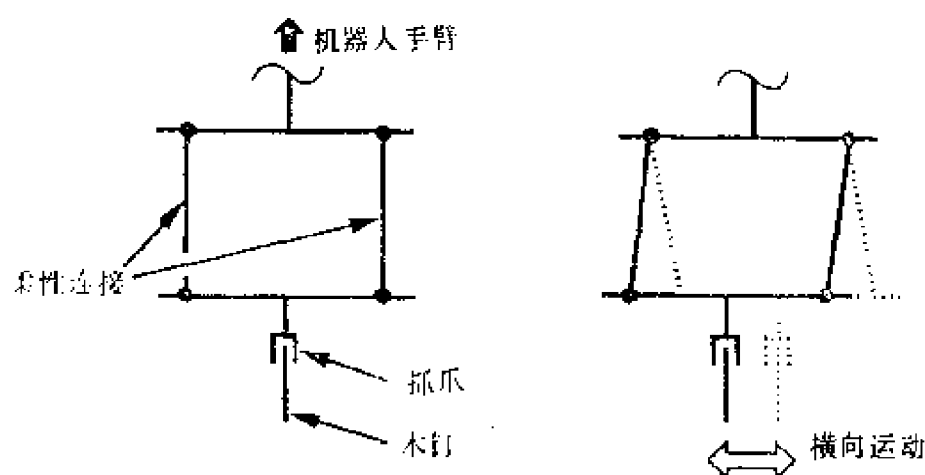


图 11.2 适合横向失调的柔性结构

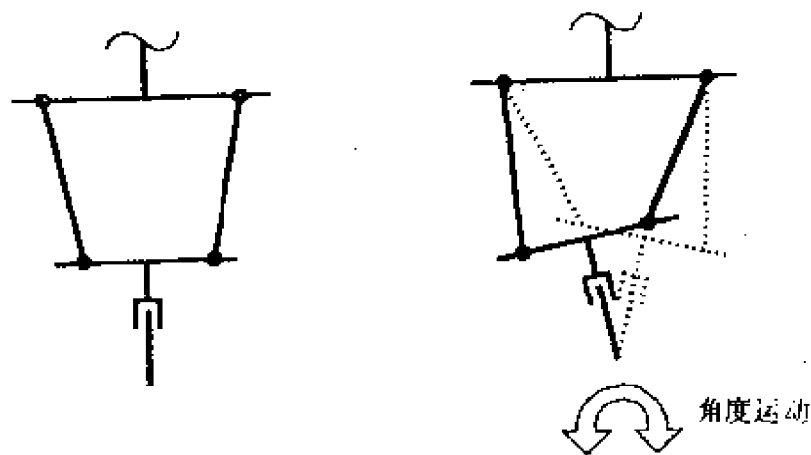


图 11.3 适合角度失调的柔性结构

遥控中心柔性是一种纯被动机械装置。通过插入操作过程中产生的力敏感和在适当状态下控制机器人关节伺服，可获得类似的效果。跟获得同样柔性运动的伺服控制相比，遥控中心柔性装置较快速并便宜。但是，在程序控制下机器人柔性的大小和方向可改变时，伺服控制更适当。

## 11.2 主动柔性控制

机器人主动柔性控制有逻辑分支和连续反馈两种方法。连续反馈类似于通常的伺服控制和完成抽样的数据控制系统。图 11.4 示出这种系统的方框图。

图 11.4 的信号流程可概括如下。由要求工具的力(a)减去施加力的反馈(h)，给出误差信号(b)。误差信号(b)由地理坐标变换成关节坐标(c)。伺服电动机使机器人手臂到空间(d)的特定点，力控制的这个点也被外部物体(e)占据。因为两个物体(工具和外部物体)不能都占据空间中同一点，故机器人结构、传感器、工具和外部物体都必须少许偏转(f)，根据这些物体的组合刚性产生力(g)。这种力由传感器记录并处理，从而给出反馈信号(h)。下面分析两个例子。第一个例子如图 11.5 所示，工具和环境(在磨

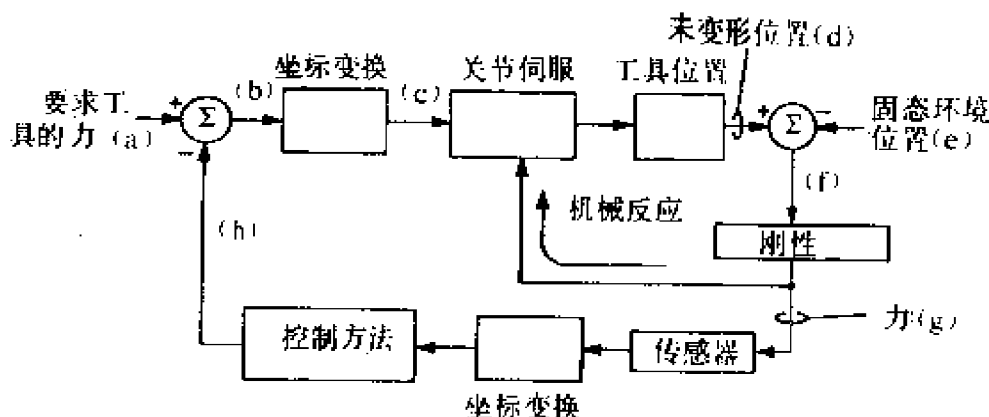


图 11.4 机器人力反馈方框图

削过程中，环境是铸件而工具是磨轮)之间保持恒定力。图中 Arm 是机械臂，它把伺服转矩(用关节坐标表示)变换成工具位置(用地理坐标表示)； $\underline{F}$  是工具和环境间的接触力； $\underline{F}_D$  是要求的接触力； $J^T$  是臂雅科毕行列式，该式跟机器人臂伺服电动机位置/角度的小变化对工具位置(用地理坐标测量)产生的小变化有联系。雅科毕行列式随机器人臂的结构的变化而变化； $K_F$  是反馈环路中可调节的增益； $K_E$  是全部接触项目(臂、传感器、环境等)的总刚性(力/距离)；传感器能把由接触产生的力变换成适合于力控制系统处理的信号； $\underline{x}$  是固态接点没有形成时工具的位置； $\underline{x}_E$  是跟固态环境接触的位置； $\tau$  是臂伺服产生的转矩。

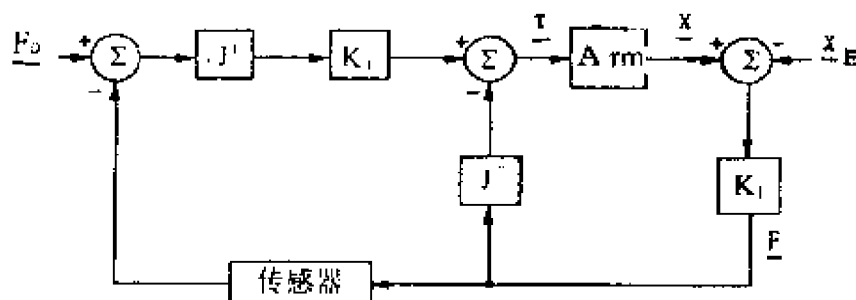


图 11.5 机器人操纵器的力控制

只有工具和环境接触时力控制才工作。若接触消失则机器人臂受大的加速度作用，除非这个条件事先被检测到并去掉力控制。另一种控制方法是使用一个位置控制器，但同样需要由施加

的力反馈来改进机器人臂的表观刚性。刚性控制的执行过程如图 11.6 所示。两种环路反馈位置和速度提供位置控制。一种附加的环路提供反向力，以便机器人受到一定的力时在要求的位置停止短时间。

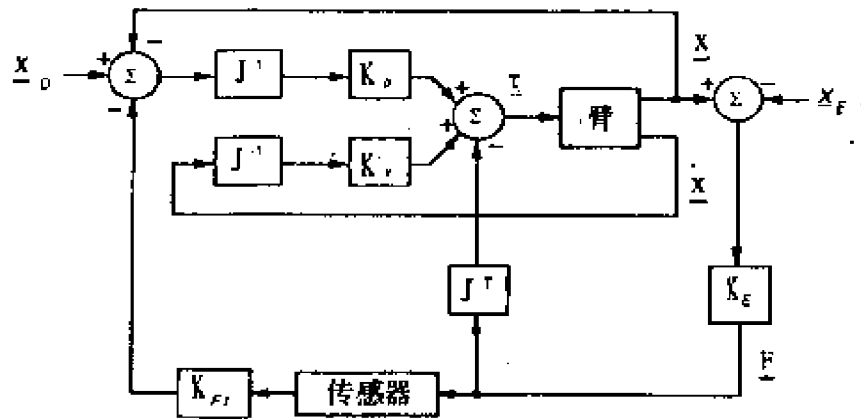


图 11.6 机器人操纵器的刚性控制

图 11.6 中  $x_F$  是要求的位置； $K_P$  是反馈正比于位置误差时的可调节增益； $k_v$  是反馈正比于速度时的可调节增益； $K_F$  是调节机器人臂表观刚性的矩阵。还有阻尼控制、阻抗控制和混合控制，这些控制都能改进机器人臂的柔性。

通过如同计算机程序那样的控制可获得类似的效果。例如，将一个木钉插入一个孔，该孔轴跟  $z$  方向构成一线，则可用下述指令：

```
COMPLYFFORCE XO {move to reduce forces in x direction to zero}
COMPLYFFORCE YO {move to reduce forces in y direction to zero}
COMPLYFFORCE XO {rotate reduce torques about x axis to zero}
COMPLYFFORCE YO {rotate reduce torques about y axis to zero}
STOP FORCE Z-1 {stop when force in negative z direction  $\geq 1$ }
MOVE Z {move in the positive z direction}
```

当执行 MOVE 指令时，COMPLY 和 STOP 指令也执行，因而机器人在  $z$  方向移动，而在  $x$  和  $y$  方向提供力和转矩。逻辑分支和连续反馈均可用于完成力反馈。两者都出现很类似的系统稳定性问题。用一个大的  $K$  值(刚性)接触表面时，机器人臂呈现出稳

定的低K。控制机器人臂给出的柔性运动导致响应的灵敏度低。但是，机器人臂做得小一点可改进动态响应。

### 11.3 通过跟踪面积图像中心和最小惯性矩的轴检测滑动

若机器人抓爪的指垫跟力传感器阵列相结合，则传感器的输出可用于检测滑动。物体通过手指滑动时传感器触觉图像会变化。所以，一种简单的方法可监控触觉图像和解释由于滑动造成的变化。但是，力图像因抓爪抓得不太紧而随抓握物体的运动产生变化。许多信息可采用为分析二进制可见图像而发展起来的图像处理技术从触觉图像中推导出来。这些技术可检测滑动的速度和方向，也可检测物体是否趋向于旋转。

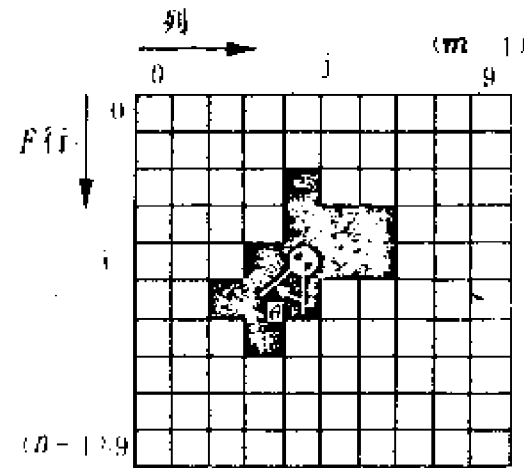


图 11.7 一个 10×10 二进制触觉图像

如图 11.7 所示，触觉传感器的输出是具有  $i$  行和  $j$  列值的二维阵列。每个触觉敏感点产生输出  $t_{ij}$ ，该输出值在  $t_{min}$  和  $t_{max}$  之间。

传感器输出  $t_{ij}$  转换成二进制值  $\tau_{ij}$

若  $t_{min} \leq t < t_{\text{阈值}}$ ，则  $\tau_{ij} = 0$

若  $t_{\text{阈值}} \leq t \leq t_{max}$ ，则  $\tau_{ij} = 1$

设输出高于阈值的传感器跟物体接触，而输出低于阈值的传感器不跟物体接触。

使用某种图像面积低级矩技术，则面积矩定义为

$$m_N = \sum_i \sum_j i^p j^q \tau_{ij} \tag{11.1}$$

因此，总接触面积为



$$A = m_{00} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \tau_{ij} \quad (11.2)$$

触觉图像位置可通过测定行和列坐标面积中心的位置找到：

$$i_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}} = \frac{1}{A} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} i \tau_{ij} \quad (11.3)$$

$$j_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} = \frac{1}{A} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} j \tau_{ij} \quad (11.4)$$

在图像的最小惯性矩的轴中其轨迹变化可估计方向：

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2(m_{00} \cdot m_{11} - m_{10} \cdot m_{01})}{(m_{00} \cdot m_{20} - m_{10}^2) - (m_{01} \cdot m_{02} - m_{01}^2)} \right] \quad (11.5)$$

在计算反正切中有一个非单值性。式(11.5)中分子和分母的符号是已知的，故可解析非单值性。图 11.8 示出分子和分母的符号之间关系，以及对应的  $\theta_0$  的范围。

图 11.7 中采用二进制图像计算面积中心和最小惯性矩的轴。

象素	i	j	$m_{00}$	$m_{10}$	$m_{01}$	$m_{11}$	$m_{20}$	$m_{02}$
0	2	4	1	2	4	8	4	16
1	3	4	1	3	4	12	9	16
2	3	5	1	3	5	15	9	25
3	3	6	1	3	6	18	9	36
4	4	3	1	4	3	12	16	9
5	4	4	1	4	4	16	16	16
6	4	5	1	4	5	20	16	25
7	4	6	1	4	6	24	16	36
8	5	2	1	5	2	10	25	4
9	5	3	1	5	3	15	25	9
10	5	4	1	5	4	20	25	16
11	6	3	1	6	3	18	36	9
			12	48	49	188	206	217

面积 = 12

$$i_0 = 48/12 = 4.00$$

$$j_0 = 49/12 = 4.08$$

$$\begin{aligned}\theta_0 &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2(12 \times 188 - 48 \times 49)}{(12 \times 206 - 48^2) - (12 \times 217 - 49^2)} \\ &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{(-192)}{(-35)} \\ &= 39.83^\circ\end{aligned}$$

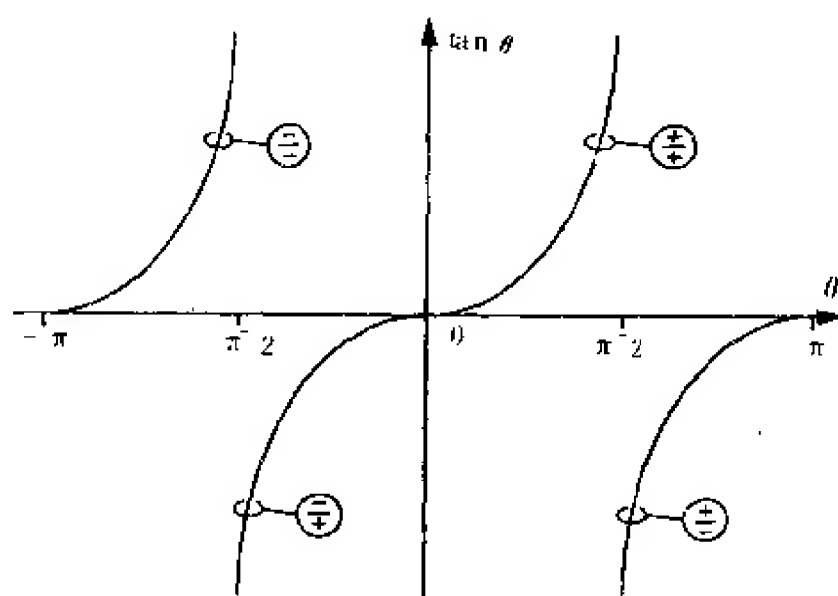


图 11.8 分子和分母的符号之间的关系以及反正切值

若面积中心和最小惯性矩的角度跟踪超时，则可估计触觉图像的线性和旋转运动。图 11.9 示出一种程序的输出，该图是在超过 30s 的时间内描绘出这些量的曲线。约 5s 内图像不移动，然后在  $x$  方向转动。物体用手移动，故传感器输出有起伏。

采用这类信息，抓爪的单纯柔性拉紧或跟抓爪成垂直线的物体重心的操纵器的旋转可抵消滑动。进一步改进，还可形成智能响应。

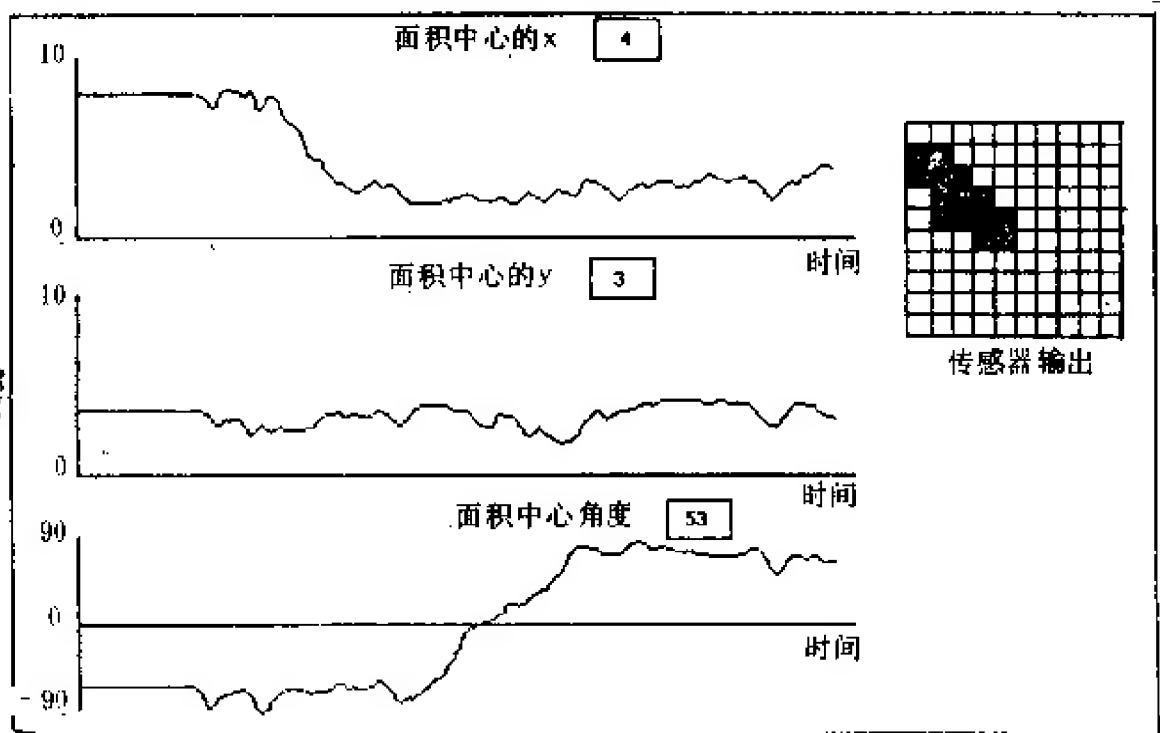


图 11.9 在  $10 \times 10$  图像力传感器表面上移动物体的面积中心和最小惯性力矩的跟踪运动

## 第十二章 触觉数据的模式识别

在抓握、操纵、检验和装配中，对未知物体的识别十分重要。本章论述用于分类触觉传感器由未知物体获取数据的一些方法，这就是将由未知物体获取的数据跟由已知物体预先获取的数据进行比较。若传感器数据和预先记录的一组数据十分接近，则可认为已识别物体。若传感器数据和预先记录的数据无类似性，则该物体是未知物体。这种方法仅适用于特定环境，也就是触觉传感器系统能跟少量预先识别的物体接触。本章介绍的大部分技术已用于计算机视觉领域。

### 12.1 样本匹配

样本是触觉图像的部分或全部，而图像是通过跟已知物体接触而得到的。跟新物体接触记录的触觉数据跟一个或多个样本作对比，若新的传感器读数以某种特定精度跟一个样本匹配，则可认为待研究的物体跟样本对应的物体相同。可通过移动和对比使样本和新传感器数据之间的差减至最小。触觉图像的代表是数据点的二维阵列。图 12.1 示出匹配处理后简化的一维实例。在该实例中，样本  $t$  是以  $i$  间隔抽样的正弦曲线。测量数据  $m$  由  $j$  个样本组成。样本逐渐向右增加移动量  $x$  时，测量数据跟样本相比较。测量数据和样本移动  $x$  之间的差  $dx$  可通过数据点之间差的绝对值总和计算出，即

$$d_x = \sum_{y=1}^i |m_{(y+x)} - t_y|$$

另外，数据点间差的平方和为：

• 180 •

$$S_x = \sum_{y=1}^i (m_{(y+x)} - t_y)^2$$

差  $dx$  和  $S_x$  的最小值表示测量数据和样本间位置的最佳匹配。该技术用于二维图像时，每个样本必须在两个正交方向以增量移动和在每个点以增量旋转进行测试。这就提出一个大的计算负担问题，甚至对分辨率相当低的触觉数据也是一样。任何一种减少探索量的方法都能使匹配处理大大简化。下述两种匹配技术使用二维轮廓图像，并通过变换数据样本匹配简化到一维。

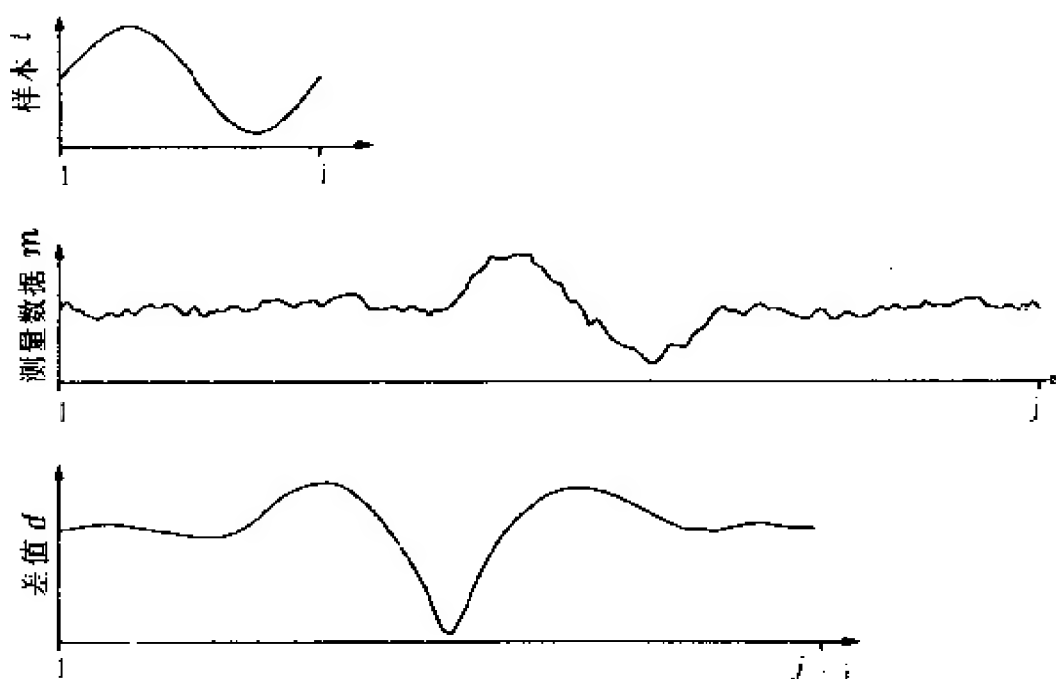


图 12.1 一维数据的样本匹配示例

## 12.2 匹配二维轮廓

### 12.2.1 单位矢量分布

1982 年 OzaKi 等人介绍了一种识别机器人手抓握物体的技术。他们的机器人手装有高柔性的传感器垫片，这种传感器垫片

能检测所抓握物体整个接触面的三维表面形状。跟每个指关节连接的电位计可检测指垫取向。

传感器输出通过处理，使数据点跟平滑曲线一致，这种输出的读数高于预定阈值。低于阈值的传感器读数可认为跟传感器和物体间无接触的面积相对应。符合的曲线分割成增量  $s$  毫米长，考虑指垫的取向可计算出每个增量的取向(单位矢量)。这些单位矢量量子化成  $n$  角度范围，并计算每个范围内矢量数的总数。每个范围单位矢量积累总数可给出单位矢量数与量子化角的条带图，条带图叫做单位矢量分布(UVD)，图 12.2 示出有长方形截面和圆角的物体整个单位矢量分布。触觉传感器垫片获取的信息往往不完全，并且还含有如图 12.3 所示的有水平方向移动 UVD 的角度位移。UVD 不受物体相对于手指的线位移影响。

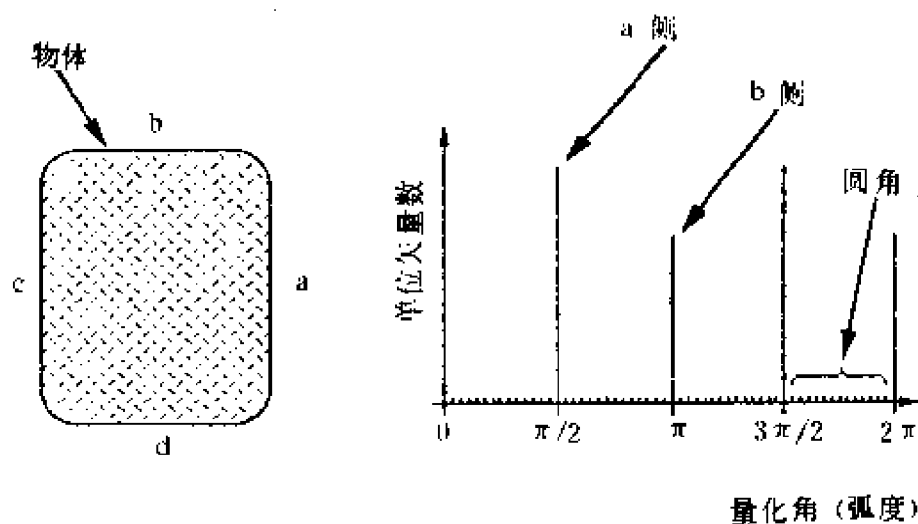


图 12.2 用作样本物体的整个单位矢量分布

为了识别未知物体，传感器数据跟采用 12.1 所述技术将所有已知物体尽可能量化的角度取向存储在系统中的样本进行对比。存储样本上的涂污操作使样本数据造成匹配操作的容许误差。采用这种匹配技术系统能鉴别圆筒和棱镜。

凸状外形物体对应的 UVD 是独特的，但在凹状外形情况下，为了识别物体还需要产生单位矢量的程序，并且这种信息保留在

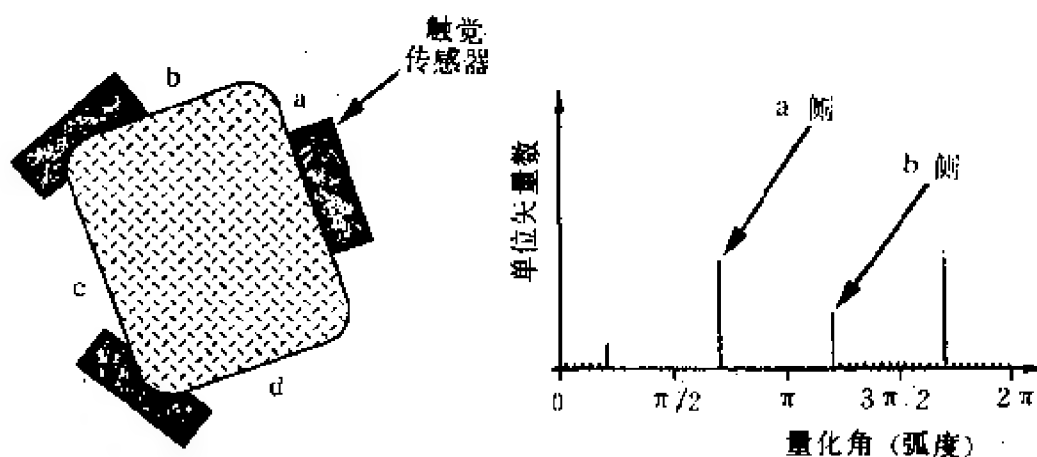


图 12.3 用于测量未知物体部分单位矢量分布的触觉传感器衬垫 UVD 中。如前所述，该技术通过物体用于三维薄片。将表面分割成小平面片，这种技术可扩展到三维表面轮廓。

### 12.2.2 在 S-θ 空间的匹配

这是另外一种识别二维轮廓图像的方法。在最初应用中轮廓数据用触须探针收集。轮廓分割成相等长度  $s$  毫米的短片。通过保留单位矢量将以前保留在凹状物体上的限制除去。每片依次描绘在轮廓周围  $S$  距离与轮廓成  $\tan\theta$  角度的图片上。图 12.4 示出模子的廓影图像和对应的 S-θ 图。

S-θ 表示曲线形状跟物体与传感器取向无关，并且曲线形状和位置跟物体相对于传感器的线位移无关。随取向的角度改变，曲线垂直地显示出来。样本通过记录由系统已知的每个物体的扫描轮廓教给系统。一个未知物体的 S-θ 信息通过采用每个样本的片断来等同，并把它跟测量数据对比以找到最佳的一致性。为了允许物体和样本之间取向上的差别，样本的平均值和传感器数据的平均值在对比前应使之保持均衡。

$$d_x = \sum_{y=1}^i |(m_{(y+x)} - m_{\text{mean}}) - (t_y - t_{\text{mean}})| \quad (12.3)$$

式中

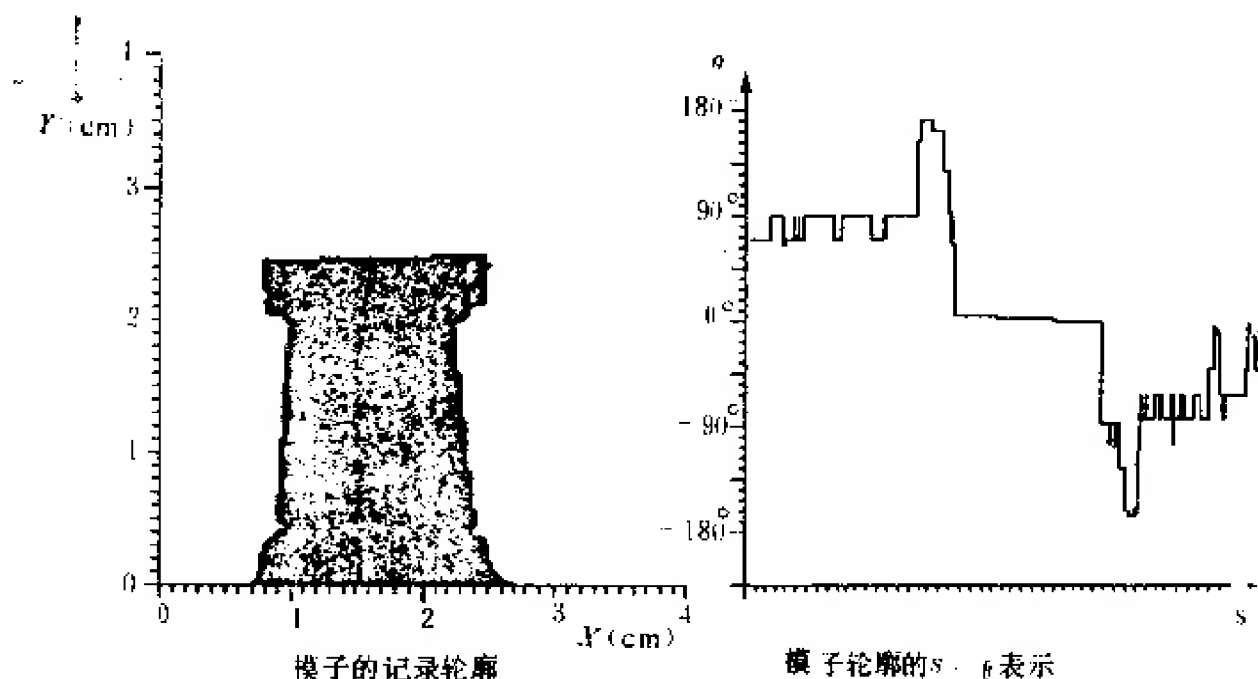


图 12.4 模子的轮廓和  $S-\theta$  表示

$$t_{\text{mean}} = \frac{\sum_{y=1}^i t_y}{i} \quad (12.4)$$

和:

$$m_{\text{mean}} = \frac{\sum_{y=1}^i m_{(y+x)}}{i} \quad (12.5)$$

成功的匹配，样本的平均值和测量数据的平均值之间的差给出样本和测量物体之间的角位移。

### 12.3 用稀少数据识别物体

1984 年 Grimson 等人提出了一种用少量数据点识别物体的技术。这种技术需要所有已知物体有精确的几何模型和具有某种可动形式的触觉传感器。该传感器必须能够精确地位于接点上和在接点上以略低精确度垂直于表面。这种方法仅适用于多边形工作，但能应用于三维。



设想一个有  $n_i = 4$  边的平面物体  $O_i$ 。触觉传感器在点 1(P1) 第一次跟  $O_i$  接触时, 接触是在四边的任何一边上。同样, 第二次是在点 2 (P2) 接触, 也是在四边的任何一边上, 因此, 给出十六个可能接点。这在图 12.5 所示解释树(IT)中作了图解说明。IT 表明跟物体面接

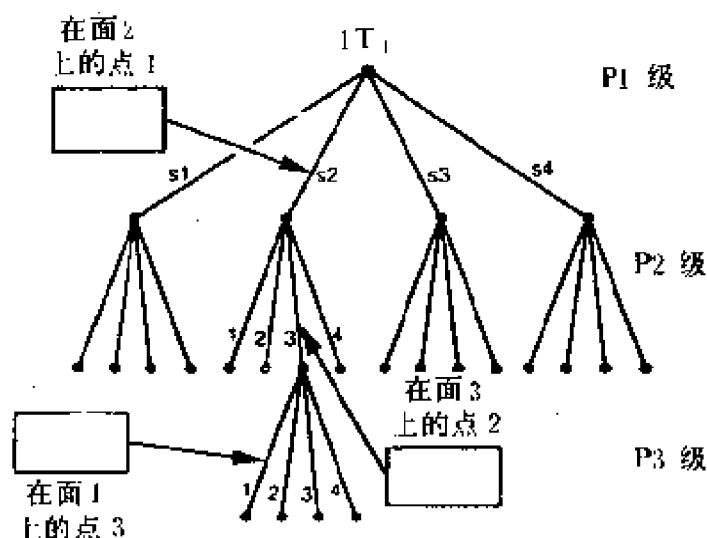


图 12.5 解释树

点的全部可能对。从树顶到底部的一个路径表示传感器数据的一种可能解释。对系统来说, 每个已知物体都有不同的树。在  $n$  面上的  $S$  点有  $n^2$  个可能解释。这种技术的概念是用局部约束以除去跟物体面接点的无用对, 从而简化 IT。

(1)距离——每一对接点  $P_i$  间必有一个可能的距离。例如, 图 12.6 中若  $P_1$  位于面  $x$  而  $P_2$  位于面  $y$  上, 则  $P_1$  和  $P_2$  间的距离必须处在最小和最大之间。

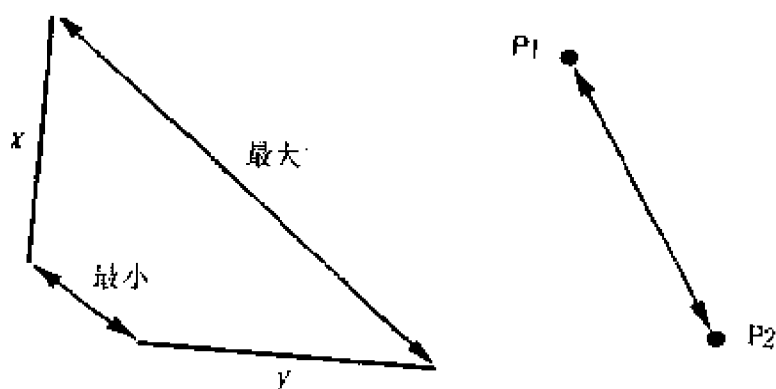


图 12.6 接点间可能的距离

(2)角——测量法线和模型法线间的角度必须一致。因为表

面法线的测量结果不精确，故面  $x$  和  $y$  有一个可容许的法线范围。对位于面  $x$  的  $P_1$  和位于面  $y$  的  $P_2$  来说，所测量的表面法线间的角必须位于图 12.7 所示的最小角和最大角之间。

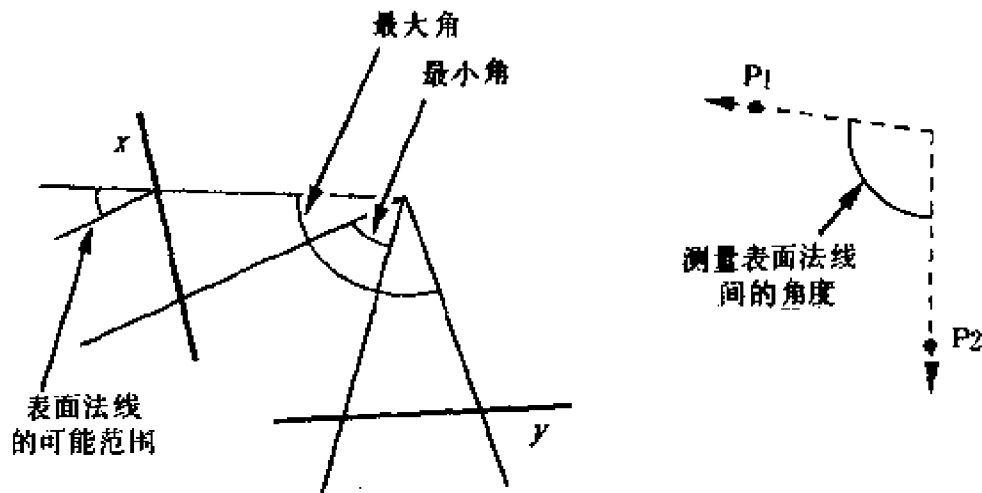


图 12.7 测量表面法线间可能的角度

(3) 方向——在接点的表面法线跟接点与另一接点间的矢量之间的方向必须位于可能的范围内。

接点跟这些测试一次或多次失误的面的全部成对可从 IT 中省去。记录许多接点后 IT 省去一些解释，通过确定跟记录数据匹配样本的旋转和位移测试剩余解释。若有多于一个可能的解释，则必须收集更多的数据。

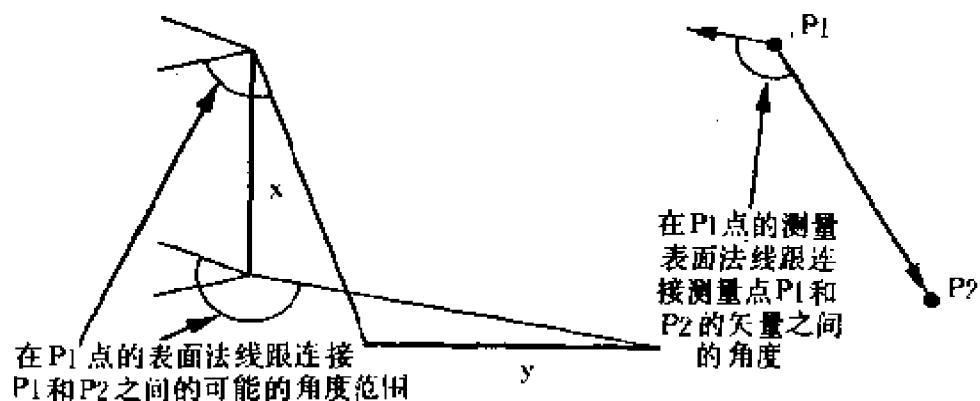


图 12.8  $P_1$  点的表面法线跟  $P_1$  和  $P_2$  点间的矢量之间的可能角度

## 12.4 二进制触觉图像的分类

由第十一章可知，根据触觉传感器阵列导出的二进制图像可用于确定抓握物体的位置和取向。不同物体产生不同二进制图像，通过对比各种图像的特征则可区别物体。分类图像的特征跟传感器上图像的取向无关。例如，物体面积就是跟旋转无关的特征。伸展和延长是两个由面积矩(见第十一章)导出的附加参量，它们也跟旋转无关：

$$\text{伸展} = \frac{a + c}{m_{00}^2} \quad (12.6)$$

$$\text{延长} = \frac{\sqrt{b^2 + (a - c)^2}}{a + c} \quad (12.7)$$

式中，

$$a = m_{20} - m_{10}^2 / m_{00}^2 \quad (12.8)$$

$$b = m_{11} - (m_{10}m_{01}) / m_{00}^2 \quad (12.9)$$

$$c = m_{02} - m_{01}^2 / m_{00}^2 \quad (12.10)$$

顾名思义，伸展是图像压缩的量度，而延长则是指出图像是否沿优先轴的伸展。图 12.9 示出小二进制图像及其伸展和延长的对应值。附加特征(如圆周)还需要改进鉴别能力。对于一个特别的应用，为了分类处理可选择  $n$  个特征。这些特征可定义为一个  $n$  维空间，在该空间有表示点坐标特征的测量值。





				
伸展	0.156	0.188	0.219	0.305
延长	0.200	0.667	0.452	0.156

图 12.9 某种小二进制斑点伸展和延长的实例

由于量化误差和测量噪声使每个特征(对同样物体)的测量值有变化。若选择适合的特征,则对应于每个物体的点群集在一起,如图 12.10 所示。对一个未知物体分类的简单方法是计算该物体特征空间的点和每个已知物体位置之间的欧几里德距离。假定未知物体等同于最接近的已知物体。还有其他许多技术可用于完成分类。

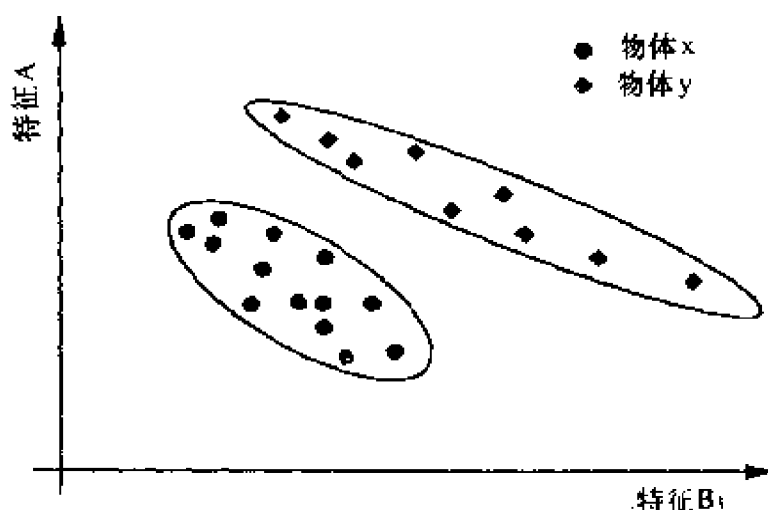


图 12.10 特征空间中物体的群集

类似的图形分类技术已应用于由机器人抓爪抓握物体获得的数据。手指关节角和在二进制传感器阵列上接触的图形都用作多维空间的坐标。缺点是在这些环境下它只能鉴别形状的有限范围。

## 12.5 视觉视场与触觉视场

用视觉传感器或通过选择适合的观点(或调整视场透镜),以单一图像获得物体一侧的完整视图。在视觉图像处理中,信息流主要趋向于向上,从原始数据到较高级和更多的表示为抽象形式,最终目标是叙述位置、取向和物体的同一性。触觉传感器只能通过有源测定比传感器面积大的物体来改进它们的视场。一种方

法是用光栅扫描方式激励未知物体来模拟大的传感器，因而形成适当尺寸的图像。另一种方法是采用传感器跟踪物体重要的特征，有源探索触觉信息。这种有源敏感技术将在下章讨论。

## 第十三章 主动触觉敏感

第十二章中叙述用触觉信息识别物体的方法，其主要技术是根据处理视觉图像发展起来的算法。通常视觉系统的视场可调节到给出一个物体的完整图像，敏感处理包括获取未知物体的图像，并通过处理合成数据来识别物体。这种敏感示例跟触觉敏感的特性不匹配，触觉敏感器件阵列的尺寸一般远小于待检查的物体，故不能根据物体一个接点的结果而形成物体的完整图像。跟视觉对比，触觉敏感要求对一个物体有源探索，以便描绘表面轮廓和测试材料的机械柔性。

主动触觉敏感在两个层次发生。在低层次，许多物体性能可用简单测试推导出来(象挤压一只梨查看是否成熟，或用一个手指触摸板的外部边缘以量出板的尺寸)。在较高层次，严格的敏感方法通过验证假设识别未知物体。首先提出跟数据的可能解释有联系的假设，然后验证它们的一致性。找出一种说明全部观察数的表示，并提供跟传感器数据相符合的解释。若找不到一种一致的表示，则安排更多的敏感运动以收集信息，这种信息可帮助解决单值性和提供对所有传感器数据各自的解释。

### 13.1 触觉性能的测量

触觉敏感可广泛测量材料性能。它们可根据控制测量程序需要的智能量分类。在最低层次，使用简单预先确定的工作程序测定触觉本原。在本章稍后引入的“触觉本原”、“触觉特征”和“探索程序”三个术语由宾州大学的科学工作者提出。触觉本原是由传感器数据直接推导出来的物体性能，表 13.1 列出触觉本原的范

围和需要测量它们的传感器数据。

表 13.1 可从传感器数据直接推导的触觉性能

触觉本原					
机械特性	总特性	表面形状	热	热性能	← 群集 ← 实例 待测量的参数
柔 性 回弹性 粘 性	尺 寸 质 量	角 边 缘 缘 表面法线	温 度 热 导 率 热扩散率	电 导 率 接触电位	
✓	✓				抓爪和物体间传 送的力和转矩
		✓			抓爪和物体间接 触的面积图像
✓	✓	✓			机器人抓爪的 结构
			✓		热
				✓	电

在一些情况下,诸如物体温度或质量,热敏电阻或测力计输出需要直接表示的量。其他触觉本原由简单测量程序决定,如图 13.1、13.2 和 13.3 所示。

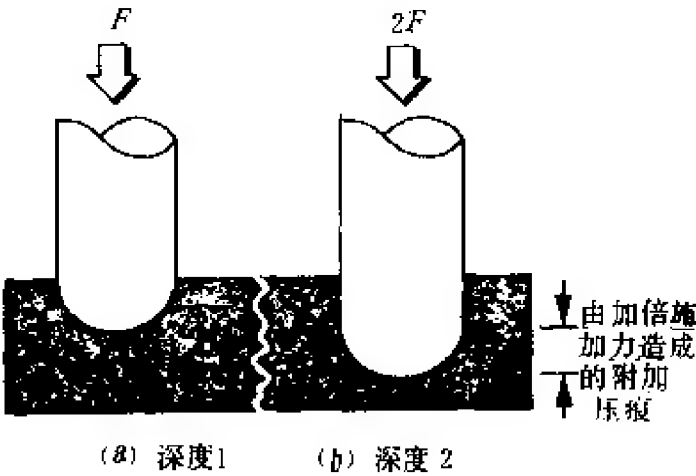


图 13.1 材料柔性的估计

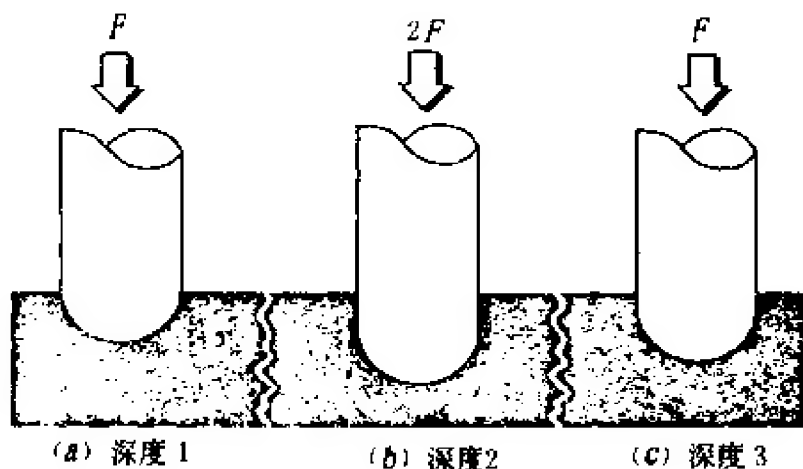


图 13.2 材料回弹性的估计

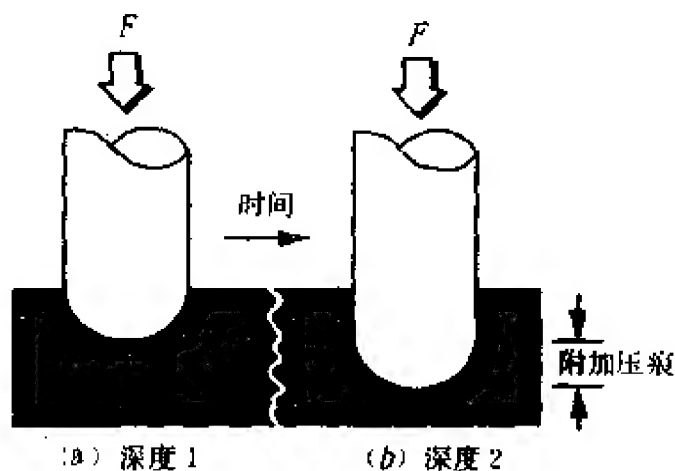


图 13.3 材料可塑性的判断

### 13.1.1 柔性的估计

柔性是指材料(或结构)受力时产生的量的量度。为了把这种测量跟实验结果联系起来,测试未知物体的硬度时,所施加的力  $F$  应限制在无损量值以内。若加足够大的力,则任何物体都会产生显著的量。

这种方法包括测量因增加施加力造成增加的压痕深度,如图 13.1 所示。完成这种测量的程序如下:

估计柔性的程序



将力  $F$  加到物体，  
存储压痕深度  $D_1$ ，  
压得更硬，一直将加给物体的力增至  $2F$ ，  
储存压痕深度  $D_2$ ，  
 $D_1$  和  $D_2$  之间的距离是柔性的量度，  
结束。

为了有效地测量，机器人、毗连的探针和材料样品支架的柔性都必须大大低于待测材料的柔性。

### 13.1.2 回弹性的估计

回弹性是指材料形变后如何更好地恢复到其初始时的形状。通过增加施加力然后降低到初始值可估计回弹量，如图 13.2 所示。探针达到最初深度的程度即是回弹性的量度。下述测量回弹的程序是估计柔性程序的延伸。

估计回弹性的程序

将直至  $F$  的力加到物体上，  
存储压痕深度  $D_1$ ，  
压得更硬，一直将加给物体的力增至  $2F$ ，  
存储压痕深度  $D_2$ ，  
使外加力降到  $F$ ，  
存储压痕深度  $D_3$ ，  
 $(D_2 - D_3) / (D_2 - D_1)$  是材料回弹的量度，  
结束。

### 13.1.3 可塑性的估计

有些材料连续受外力作用时产生过时缓慢形变。这种在交联聚合物体材料(如天然的和合成橡胶)中的粘弹特性是可逆的。形变不可逆时，这种效应称粘性。这种粘性在糖水和沥青等液体中可見到。金属中过时缓慢和不可逆形变称蠕变。因为这些术语都是

叙述类似的效应，故用“可塑性”这一术语表示施加恒定力产生过时的材料形变，使用下述程序测量(见图 13.3)。

在举起和搬运物体时重要的是监控抓握力。可塑性较高的物体受力时产生形变。如果物体的形变不能通过拉紧抓爪来调整，那么，抓爪力应降低到物体开始滑动处的力。按照下述程序估计可塑性：

估计可塑性的程序

将直至  $F$  的力加到物体上，  
存储压痕深度  $D_1$ ，  
等待一段固定时间，  
存储压痕深度  $D_2$ ，  
( $D_2 - D_1$ ) 是可塑性的量度，

结束。

#### 13.1.4 热特性

第八章中根据人的热感觉论述了热觉传感器。热觉传感器输出可用于计算跟材料接触短时间后温度下降到环境温度的百分率  $D$ 。传感器接触外部物体时，热敏传感器的这种温度下降取决于构成物体的材料的热导率和热扩散率。若跟未知材料接触后测量的  $D$  值与已知材料记录的  $D$  值对比，则可根据预先记录材料的  $D$  值范围分类未知材料。

通过研究材料密度与  $D$  值图表的关系，则可由  $D$  的测量值直接推导其他材料的性能，如图 13.4 所示。用图表中的信息可从温度下降到环境温度的百分率推出材料密度。

许多触觉本原提供有关构成物体的材料信息。每种触觉本原本身不能提供正确地识别特殊材料的足够信息，但是，许多触觉本原组合起来能提高识别的精度。图 13.5 示出根据柔性和回弹性的测量结果可鉴别不同范围的材料。

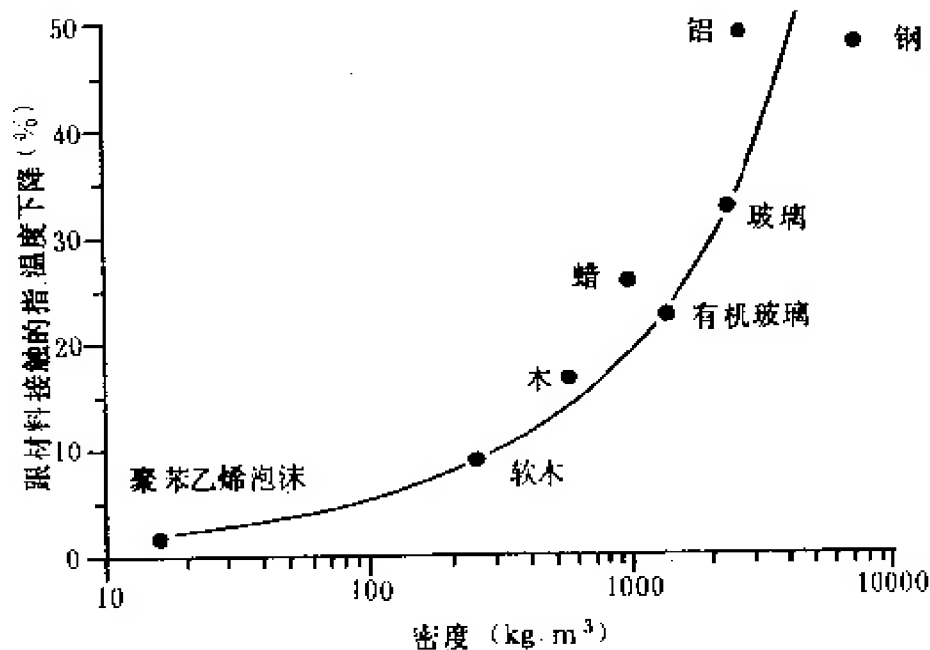


图 13.4 跟材料接触 3s 后传感器温度下降到环境温度与材料密度的关系

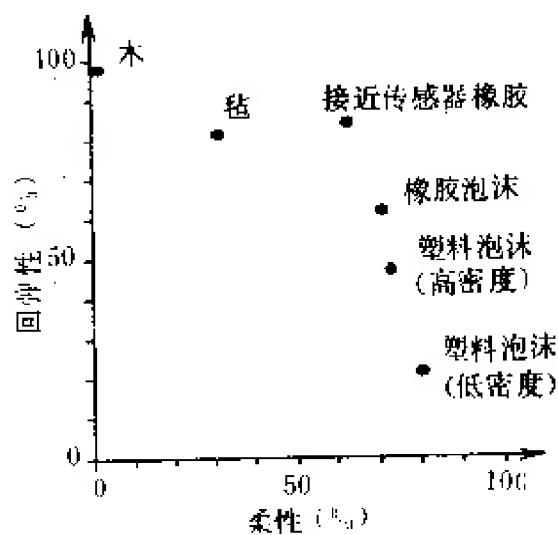


图 13.5 通过对比用算法测量的柔性和回弹性值能鉴别通用材料的范围

## 13.2 触觉特征

触觉特征在数据表示层次中处于较高层次。这种特征同样具有物体的性能，但是，需要有一定程度的智能，以便指导获取必要的信息。表 13.2 列出了一些触觉特征。

触觉特征由一个延伸的表面区域或物体各部分之间的相对运动构成。两种情况下都需要智能指导以发现物体的性质和特征的范围。包括传感器指导搜索的这类敏感原理称探索程序。

表 13.2 物体的一些触觉特征

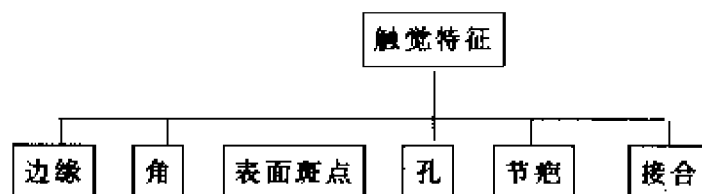


图 13.6 示出应用可移动触觉传感器探针寻找和跟踪物体二维轮廓的简单探索程序。该程序开始用搜索宽广范围的光栅扫描。连续扫描之间的间隔比搜索物体最小尺寸小，当搜索区已经覆盖或跟物体形成初始接触时光栅扫描结束。

跟物体形成接触，控制传感器移动，以便改变边缘跟踪模式并在反时针方向跟踪物体轮廓。以后每次接触传感器被拉开一个短的距离，然后移到平行于物体轮廓的地方。若在平行移动中形成接触，则轮廓呈现出向右弯曲。也就是说，传感器向左移动，从而证实轮廓的位置。若在移动中未形成接触，则轮廓呈现出向左弯曲的趋势。搜索继续进行直到传感器在初始接点到达轮廓的背部为止，在这种情况下已描绘出完整的轮廓或直到跟物体脱离接触为止。图 13.7 示出光栅扫描和跟踪轨道的范围。

显然，触觉特征在人对物体识别中极为重要。图 13.8 示出记录人的食指探索简单形状的路径。可看出在平滑表面上消耗的时间较少，大多时间集中消耗在跟踪边缘和探索跟顶接近的表面。

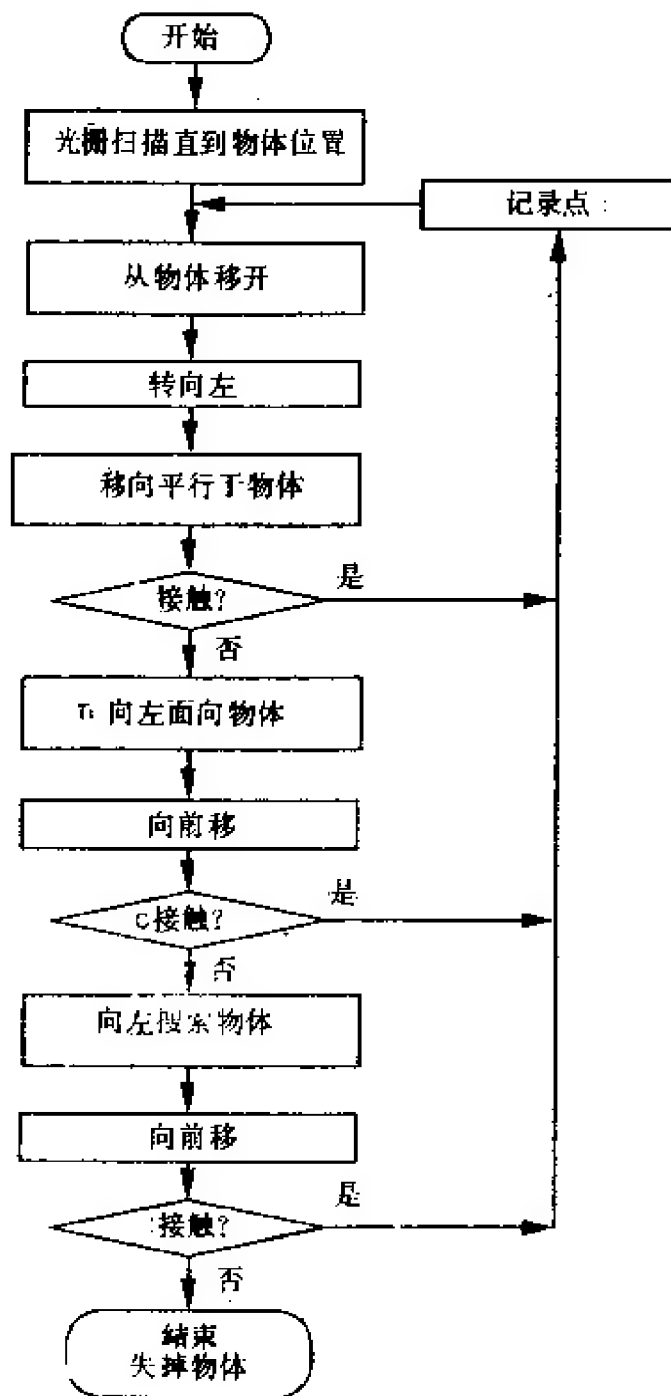


图 13.6 轮廓跟踪流程图

故在收集触觉敏感数据阶段有源敏感很重要。同样在物体识别阶段有源敏感也重要。

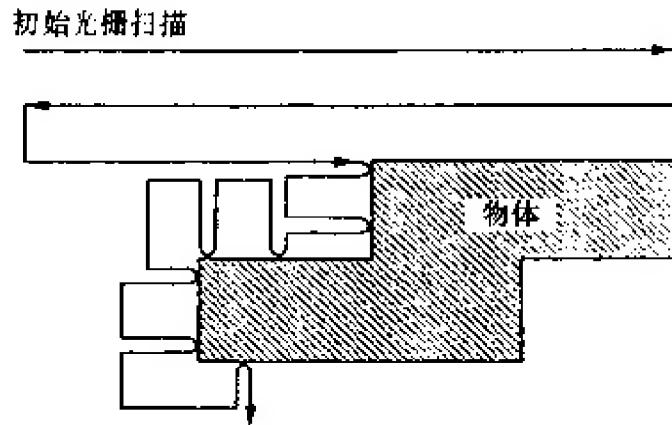


图 13.7 跟踪二维轮廓

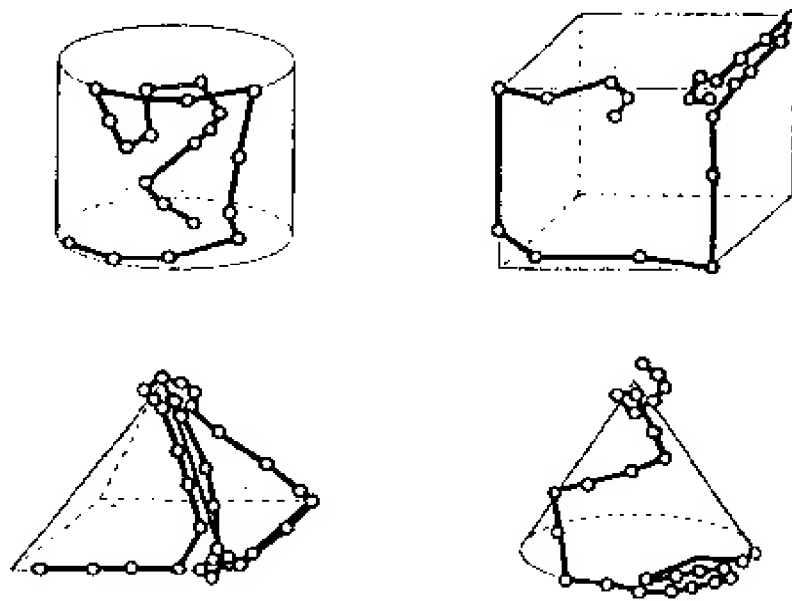


图 13.8 在探索物体中手指移动的路径

### 13.3 识别物体的方法

第十二章提出的分析触觉信息的方法遵循倒置或数据驱动方法。在这样的方案中遵循三个步骤，一旦前面的步骤完成，就不

再重复。收集和处理传感器数据并提取有用的统计数，然后，将这些结果分类以建立未知物体的同一性。这种处理如图 13.9(a) 所示。

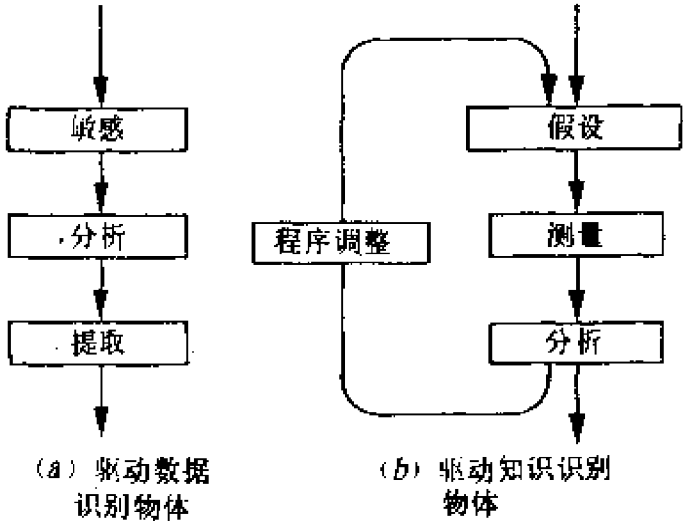


图 13.9 识别物体的两种方法

一个可供选择的方法是从物体可能是什么的假设开始，而不是从通过收集每个可以了解的有关未知物体的部分信息开始。采用物体的同一性可提供最适合的有用数据。然后通过收集有关物体的附加信息，以便检验假设。分析后决定这种附加的信息可支持最初的假设，或提出另一种新的更适合全部数据的假设。重复这种假设和图 13.9(b)所示环路直到出现的假设和数据相符合为止。通过对特别部分信息的需要进行数据收集。这种方法在触觉敏感每次收集较少信息的地点是经济的。

### 13.4 触觉敏感的特性

触觉传感器仅能测量传感器和物体接触的那一小部分物体。除了最小物体外，这种测量是正确的。另外，许多触觉性能要在完成敏感程序后才能测量，这种程序包括传感器输出和传感器产生的探索移动之间的互作用。触觉敏感的这些特性表明，触觉敏

感信息最好通过主动探索物体表面来获取。触觉可提供物体形状、表面性能和物体的材料类型等信息。将这些信息组合起来才能形成跟物体一致的图像。



# 第十四章 多路信息源的感知

## 数据融合技术

如果几种传感器合用，且它们都能提供希望的数据，那么，如何以最好的方式利用这种多路信息源则是需要考虑的问题。对这个问题通常有两种考虑的方法，一是选择单个最适用的传感器，并单独依靠它输出；二是融合全部合用传感器的数据，利用复合的结果。

### 14.1 选择传感器

由多种传感器选择单个合用的传感器，需要考虑的基本原则：

#### (1) 传感器的可靠性

所选用的传感器，不仅要有一定精度，还应有抗干扰能力，以免在恶劣环境下输出错误读数。

#### (2) 传感器的工作范围

所选用的传感器，其工作范围应等于或大于欲测量的范围。每种传感器都有一定的工作范围，例如，通用超声声纳传感器可检测物体的距离在 25~1000cm 之间。

#### (3) 功耗

传感器较长时间收集数据需要消耗大量能量，因此，选择机器人用传感器，特别是战场机器人用传感器要尽量采用功耗小的传感器。

### 14.1.1 选择传感器实例

声纳和红外传感器装在移动式机器人 Robart 上, 并围绕房间扫描, 从而确定墙壁、通道障碍物的位置。

#### (1) 声纳

声纳能产生大的超声束宽, 在  $\pm 40^\circ$  范围内能响应极小的物体。声纳有镜面反射。在  $0.27 \sim 10.7\text{m}$  内分辨率为  $3\text{mm}$ , 若进行温度和湿度补偿, 可提高分辨率。

#### (2) 红外传感器

红外传感器的接收角窄, 故物体的方位信息应有相当的精度。室内物品表面反射系数变化会使测量距离的结果不可靠, 最大测量距离取决于表面抛光程度, 约  $3.05\text{m}$ 。

上述声纳传感器能精确测量物体的距离, 但角度分辨率差。相反, 红外传感器可获得物体精确的方位信息, 而测量距离的精度差。图 14.1 示出这两种传感器的互补特性。

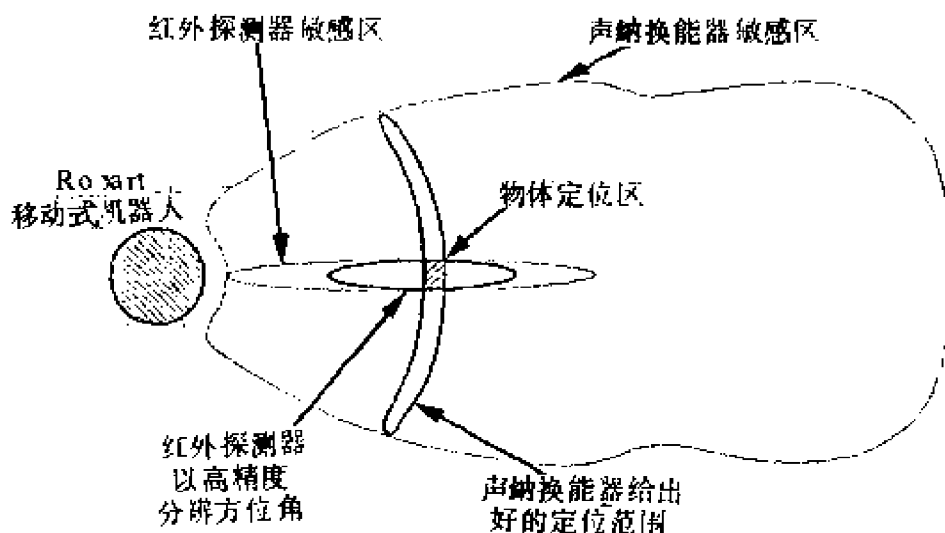


图 14.1 用声纳和红外传感器定位物体

#### (3) 联合观测的规则

融合声纳和红外传感器数据的规则: (a) 每当红外传感器检测从探测物体到未探测物体的变化时, 有关声纳的读数在  $3.05\text{m}$

内,则可检测到一个有效深度的不连续性(如通道或隔离物);(b)若声纳读数大于红外传感器的最大检测距离,则可忽略红外传感器的测量结果;(c)若声纳读数在其最大值,则实际距离较大。将这些规则用于声纳和红外传感器数据,则可建立起一个空间深度图,其精度高于单个传感器产生的图的精度。这两种传感器分别用于精确测量距离和方位。

## 14.2 融合多路传感器数据

交替地选择单个传感器,并使全部信息源的数据融合到一个模式中,该模式是通过分析每个传感器的信息可靠性而得到的。若每个传感器的误差统计结果有用,则有几种统计方法,这些方法能消除不正确读数,并将剩下的读数融合到精确的图表中。

相同量的重复测量结果由于噪声,量化错误和其他干扰影响会出现随机变化。在许多情况下读数的分布按正态或高斯分布。这种分布的概率密度函数如图 14.2 所示,其表达式为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}\right] \quad (14.1)$$

式中  $\mu$  是分布的平均值; $\delta$  是标准偏离。

若一个传感器给出量  $x$  的读数  $\mu$ ,那么,正态分布可用于确定概率, $x$  的真实值处在两个特定  $x$  值之间。位于  $x_i$  和  $x_j$  之间  $x$  的真实值的概率

$$p_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{x_i}^{x_j} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}\right] dx \quad (14.2)$$

这可以把它理解为在  $x_i$  和  $x_j$  之间正态曲线下的面积。正态曲线下的总面积为 1。正态分布依据传感器输出的变化(标准偏离  $\delta$  的平方)提供传感器数据可靠性分类的方法。

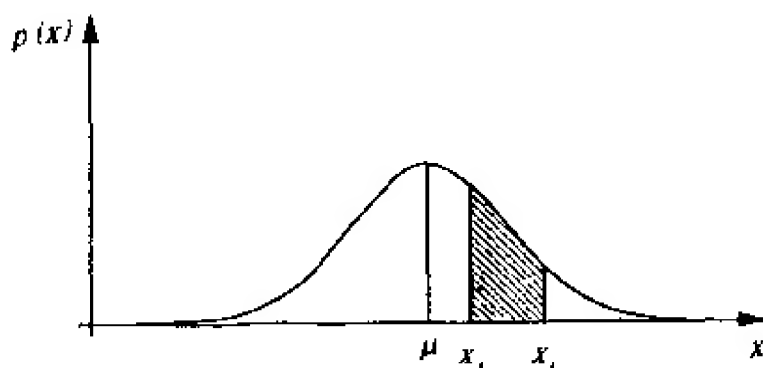


图 14.2 正态分布

### 14.2.1 消除传感器错误读数

根据多路传感器环境中允许消除传感器错误读数的技术基础,从而提出置信距离这一概念。A 和 B 两个传感器读数的概率密度函数如图 14.3 和图 14.4 所示。

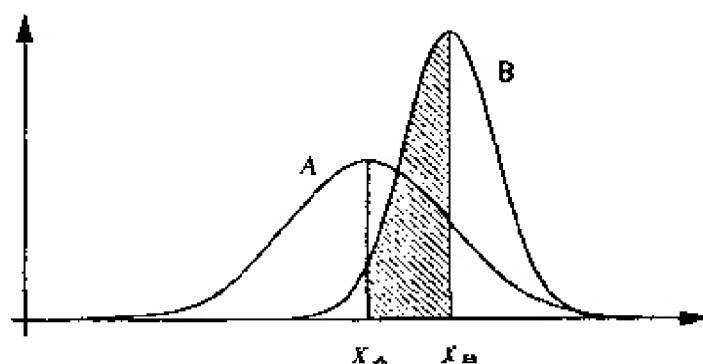


图 14.3 置信距离测量  $d_{AB}$

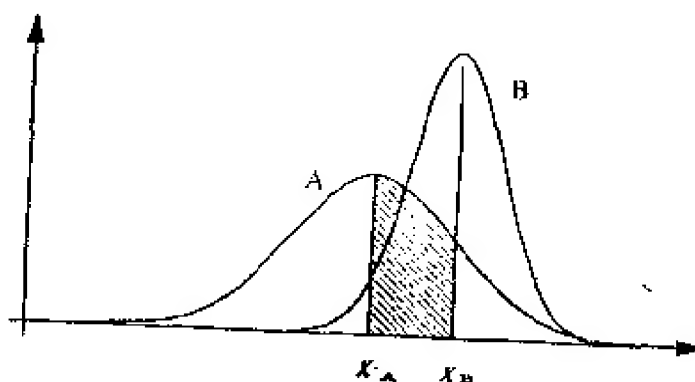


图 14.4 置信距离测量  $d_{BA}$

置信距离可通过图理解为极限  $x_A$  和  $x_B$  间某一概率密度函数的面积的二倍。因为 A 和 B 在这个区域内有概率密度函数，故有两个置信距离  $d_{AB}$  和  $d_{BA}$ 。置信距离  $d_{AB}$  可理解为  $x_B$  正确给出  $x_A$  测量值的概率。因此， $d_{AB}$  表示传感器读数  $x_A$  给出读数  $x_B$  的支持量，而  $d_{BA}$  则表示传感器读数  $x_B$  给出读数  $x_A$  的支持量。实际上，对任何 X 和 Y 传感器都预先设置了经验阈值，因而若  $d_{xy}$  低于阈值，那么从传感器 X 获得的数据跟从传感器 Y 获得的数据一致。检验多路传感器获得的数据以寻求一组读数，这些读数彼此相互一致。任何不在这一组中的传感器读数都可作不可靠读数处理。

### 14.2.2 融合多路传感器数据

标准偏差的平方可用于将多路传感器读数融合成一个组合值。传感器 A 的输出  $x_A$  和传感器 B 的输出  $x_B$  产生的组合传感器读数

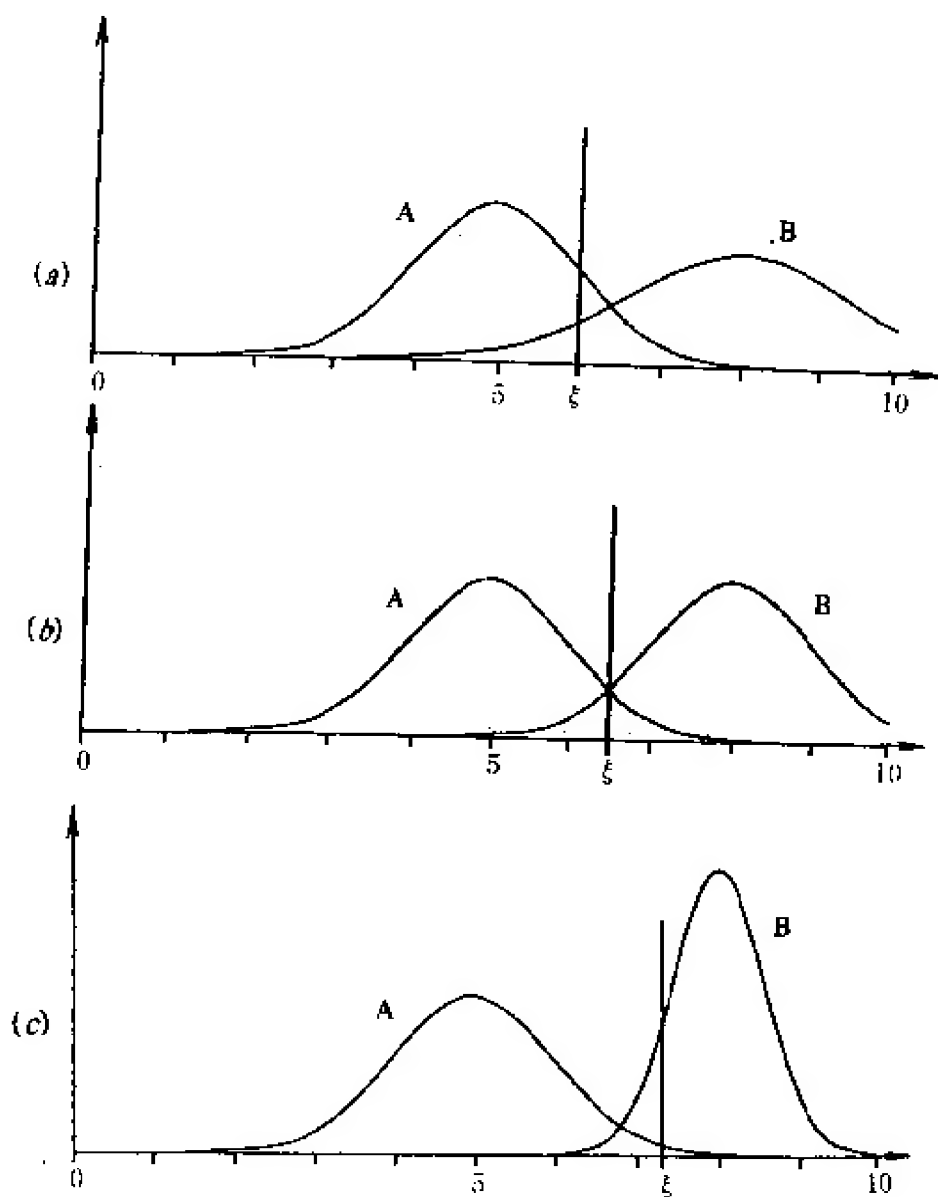
$$\xi = x_A + (x_B - x_A) \frac{\sigma_A^2}{(\sigma_A^2 + \sigma_B^2)} \quad (14.3)$$

图 14.5 示出两个传感器获得的融合数据的结果，两个传感器具有不同的离散值。正如所期待的那样，传感器有相同的离散时，组合值  $\xi$  位于两个传感器测量值的中间，传感器具有不同离散时，组合值  $\xi$  趋向于离散低的传感器。

融合数据的技术还有贝叶斯(Bayes)法和卡尔曼(Kalman)滤波等。传感器融合中主要问题是确定从不同传感器获得的数据之间的一致性。

## 14.3 多路传感器融合技术的重要性

触觉敏感本身涉及感觉模式，许多不同形式的触觉敏感输入机器人系统时，这些触觉敏感可能还要跟其他传感器系统融合，这就提出了融合多路传感器数据的问题。若用同一检测范围的传



$$(a) X_A=5.0 \quad \sigma_A=1.0 \quad X_B=8.0 \quad \sigma_B=2.0 \quad \xi=6.0$$

$$(b) X_A=5.0, \sigma_A=1.0, X_B=8.0, \sigma_B=1.0, \xi=6.5$$

$$(c) X_A=5.0, \sigma_A=1.0, X_B=8.0, \sigma_B=0.3, \xi=7.3$$

图 14.5 两个传感器的融合数据

感器测量同一参量，则有更多的信息可供分析，从而提供精确的信息。另一方面，一组传感器可提供诸如表面形状、颜色和温度等

互补的信息，这些互补的信息形成复合图像，这是用单个传感器不可能获得的。多路传感器通过并联捕获信息还有速度快的优点。

多种信息源的感知数据融合技术是当前最热门的研究课题，不断改进该技术有助于完善多路感知机器人系统。

# 第二编

## 机器人非触觉

### 第十五章 温度传感器

用于设计机器人温度传感器的物理现象主要有三种类型，即电现象、热膨胀现象和光现象<sup>[2]</sup>。

#### 15.1 电现象型温度传感器

用热敏电阻器和热电偶，以及声速与气体温度关系的电声法和热噪声法均可设计制作电现象型机器人温度传感器。图 15.1 示出包括比值计  $R_0$  和  $R_0'$  的热敏电阻型温度传感器，其中固定电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  形成三个电桥臂，第四个电桥臂是  $R_4$ 。 $R_4$  用于细调电路。电阻  $r_t$  用于补偿温度变化对电路的影响。这种传感器很精确，例如，铂热敏电阻在 1000℃ 左右的误差小于 0.01℃。

图 15.2 示出有冷端补偿的热电偶型温度传感器。热电偶是将两种不同金属(或合金)制作的导线端点焊接在一起，当其置于不同环境温度时，焊点处产生电动势

$$E = \alpha(T_1 - T_2) \quad (15.1)$$

式中  $T_1$ 、 $T_2$  是热电偶两端的环境温度， $\alpha$  是与材料性能有关的系数。图 15.2 中点 1 和点 2 分别是热电偶的热端(温度  $T_1$ )和冷端



(温度  $T_2$ )。由式(15.1)可看出,  $E$  决定于两点的温度差。因为自动控制通常需要  $T_1$  的绝对值, 故在  $\alpha-\alpha$  点之间插入一个补偿元件。这种补偿实际上是一个电桥, 其一个臂是热敏电阻  $R_t$ 。调整电路可得电压  $\Delta V$ , 热电偶产生的电压加上或减去  $\Delta V$ 。这种传感器的精度在  $10^\circ\text{C}$  左右可达  $0.04\%$ , 缺点是要求电源为恒电压。

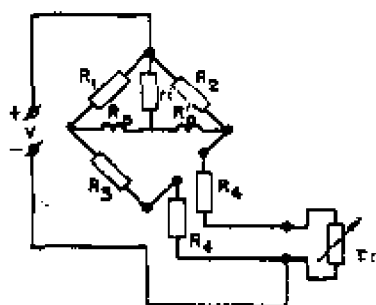


图 15.1 热敏电阻型温度传感器

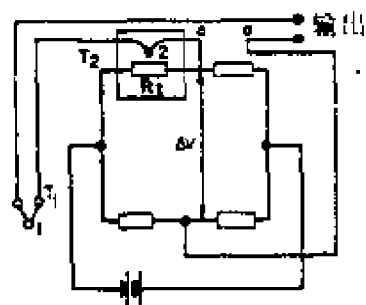


图 15.2 热电偶型温度传感器

## 15.2 热膨胀现象型温度传感器

利用金属膨胀和液体膨胀现象可设计制作机器人温度传感器。图 15.3 示出利用双金属条带开-关温度传感器。两种不同的金属条带焊接在一起, 由于两种金属的热膨胀系数不同, 故加热或冷却时条带会产生弯曲(条带仅在某一特定温度保持平坦), 从而使接点跟固定点接触(即间隙闭合)。

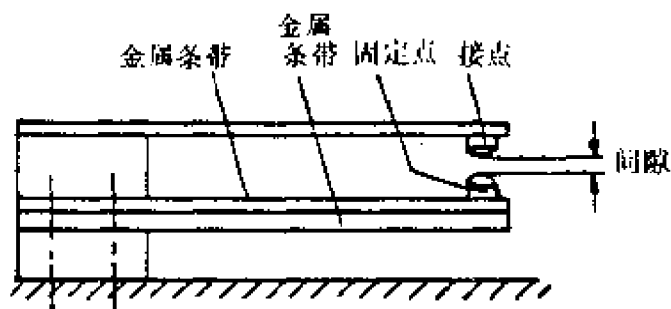


图 15.3 双金属开-关温度传感器

图 15.4 示出利用液体膨胀的温度传感器。盛于容器中的液体

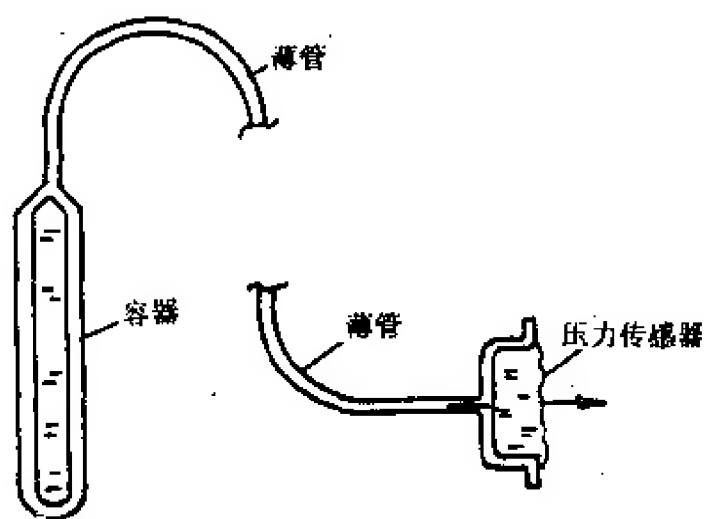


图 15.4 液体膨胀型温度传感器

由于加热或冷却而使容积变化时压力也发生变化，该压力通过薄管传送给膜片型压力传感器。膜片的形变通过位移传感器变换成有用信号。

### 15.3 光现象型温度传感器

利用非接触的光学方法可测量温度<sup>[2]</sup>。对于绝对黑体，其辐射能  $E$  与温度  $T$  有如下关系

$$E = \delta T^4 \quad (15.2)$$

式中  $\delta$  是常数。

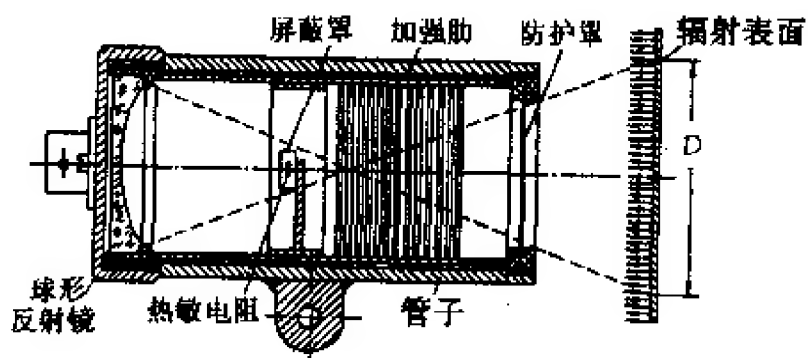


图 15.5 高温传感器

由式(15.2)可知,检测出辐射能  $E$  即可确定辐射体的温度。图 15.5 示出通过加热表面的辐射光激励的高温传感器。这种传感器低温可检测  $20^{\circ}\sim 100^{\circ}$ ,高温可检测  $100^{\circ}\sim 2500^{\circ}\text{C}$ 。辐射表面离开温度计一定距离。辐射强度与距离的平方成反比,测量精度通常为  $\pm 2.5\%$ 。

# 第十六章 检测物体有 无的传感器

## 16.1 检测物体有无的传感器用途

工业自动化装置经常要检验物体位置，从而确定在一定操作阶段硬件和程序是否正确。图 16.1 示出三个部件构成的产品装配

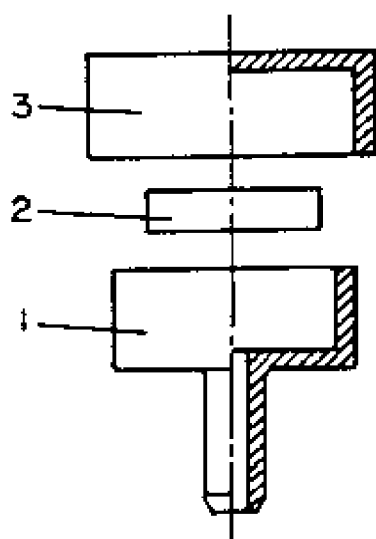


图 16.1 三个部件构成的  
产品装配实例

实例。该产品的装配从部件 1 开始，由于某种技术缺陷，该部件不能精确地放置在它的位置上，部件 2 未经检验由机械手置于它的位置上，部件 3 也盲目定位。或者部件 1 能成功地置于它的位置上，而部件 2 由于技术上的缺陷不能正确定位，然后装上部件 3。最终结果从表面上看似乎都是完好的产品，并可能就这样售出。为了检验装配后的每个部件，以便排除有缺陷的部件，这样要多花一些钱。在制作过程的

每一适当工序进行检验会增加机器成本，但可避免将有缺陷的产品卖出去。

## 16.2 检测物体有无的光传感器

解决上述问题最简单的方法是使用光传感器。图 16.2 示出正确定位部件的光学方法，光源 1a 和探测器 2a 检验分度盘 3 的插座中部件 1 的存在，光源 1b 和探测器 2b 检验装置中的部件 2。当一个或两个部件处于不正确位置时，传感器驱动系统，使机器停止工作，以阻止装配工艺继续到下一道工序，或给操作者报警。这里，光束截断说明部件处于正确位置。这种光学方法可用于检测某一位置是否存在碎片、螺栓、螺丝、螺母等杂物，亦可用于检测某一插座中部件定位是否正确。

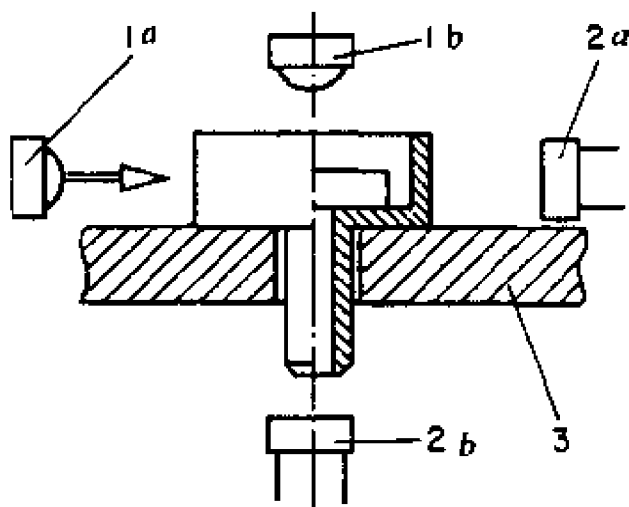


图 16.2 检验部件是否在合适位置的光学方法

## 16.3 检测物体有无的气压传感器

气压传感器可用于检测物体有无，这种传感器在检测时可不接触被测物体表面。如图 2.22(b)所示，当部件 2 不接近喷嘴 1 时，装置中的压力下降。在这种情况下，精度要求不高，这种器件已用于开关领域。

## 16.4 检测物体有无的机电传感器

机电传感器经常用于检验部件是否在其位置处。图 16.3 示出

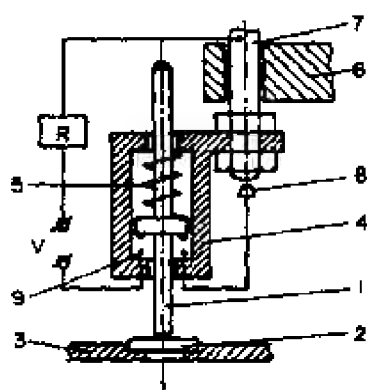


图 16.3 检验部件是否在其位置存在的机电传感器

检验部件是否在其位置存在的机电传感器。图中量规 1 检验位于移动装置 3 的插座中部件 2 是否存在，量规 1 由外壳 4 支撑，检验中通过弹簧 5 将部件推向前。外壳借助气缸、磁体和机械系统在导向装置 6 中移动。当装外壳 4 的圆棒 7 按照机器的定时图下降时，圆棒便跟 8 紧密接触。若部件 2 不位于插座中，则接点 9 也闭合（量规不加压时接点

9 总是闭合）。这时继电器 R 通电并激励出电信号，从而使机器停止或完成某一其他动作。因此，只有插座中无部件时继电器才通电（接点 8 和 9 接触）。

图 16.4 示出检验线材是否存在的机电装置。装置中量规 1 悬置在轴 2 上。轴 2 连接杠杆 3，杠杆 3 通过曲柄 4 跟棒 5 连接，从而产生振荡。当叉向左移动碰到线材 6（线状体、灯丝和棒等），线材 6 举起杠杆 3 右边的楔形块端头 7。悬置在可动轴 9 上的杠杆 8 和驱动接点 11 的按钮 10，由于弹簧 12 的作用，在正常情况下他们的接点是闭合的。这种装置如何检验线材 6 是否存在？

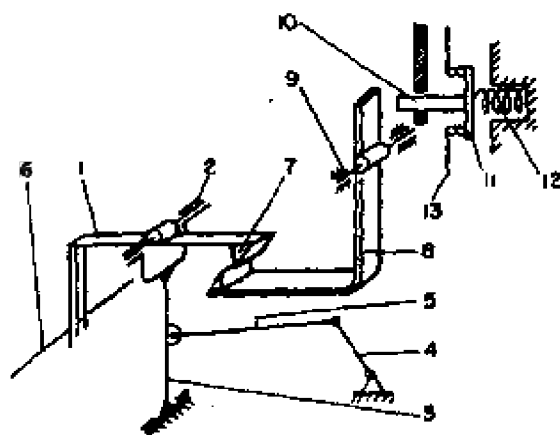


图 16.4 检验线材、棒、条带和线状体等条物品是否存在的装置

如前所述，线材举起杠杆 3 的端头 7，其不影响振荡。但是，没有线材时又不会碰到阻力，杠杆 3 的端头 7 停留在下边，并对应地引起杠杆 8 的端头连接，这就导致杠杆 8 移动，于是，8 的上端移动按钮 10，从而使 11 分离并断开电路 13。这种信号可用于停止机器或给工作人员发信号。这种装置实际上是早已用于纺织机械检验纺织物是否存在的老式装置。

## 第十七章 距离传感技术

距离传感器用于检测在工作范围内的物体到参考点(通常在传感器上)的距离。机器人用距离传感器引导和避障,实现这一功能的关键是检测机器人上的参考点到物体的最近距离。本章介绍几种距离传感技术。

### 17.1 利用三角测量方法的距离传感技术

三角测量方法的原理如图 17.1 所示,这是一种最简单的检测距离的方法。一物体被在表面上扫描的窄光束照射,扫描在由物体到检测器和由检测器到光源的两直线所确定的平面内进行。因为光源与基线之间的角度,以及光源与检测器之间的距离是已知的,故检测器看到光点时,检测器到物体表面被照部分的距离  $D$  可根据图 17.1 所示的几何关系求出。

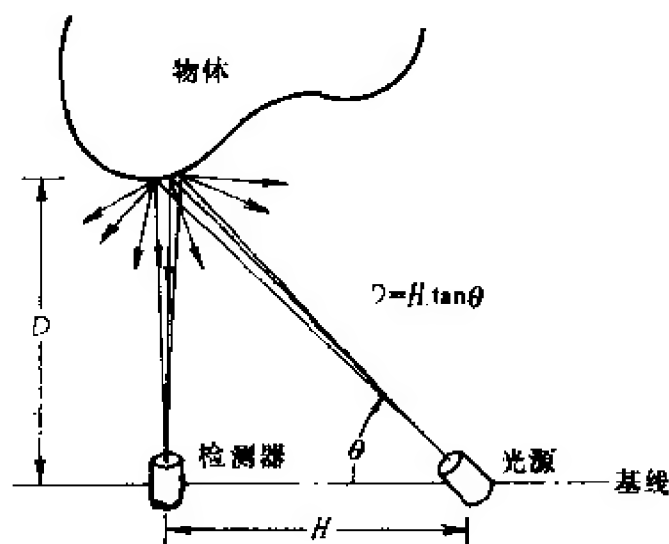


图 17.1 三角测量方法的工作原理



上述方法仅给出一个点的测量值。若使光源-检测器组合在一个确定的平面内运动(在垂直于纸面并包含图 17.1 基线的平面内前后移动),则可得到一组点,它们与检测器的距离是已知的。在对物体扫描时,只要记录下检测器的姿态轨迹,便可将这些距离量转换成三维坐标。

## 17.2 利用结构光方法的距离传感器技术

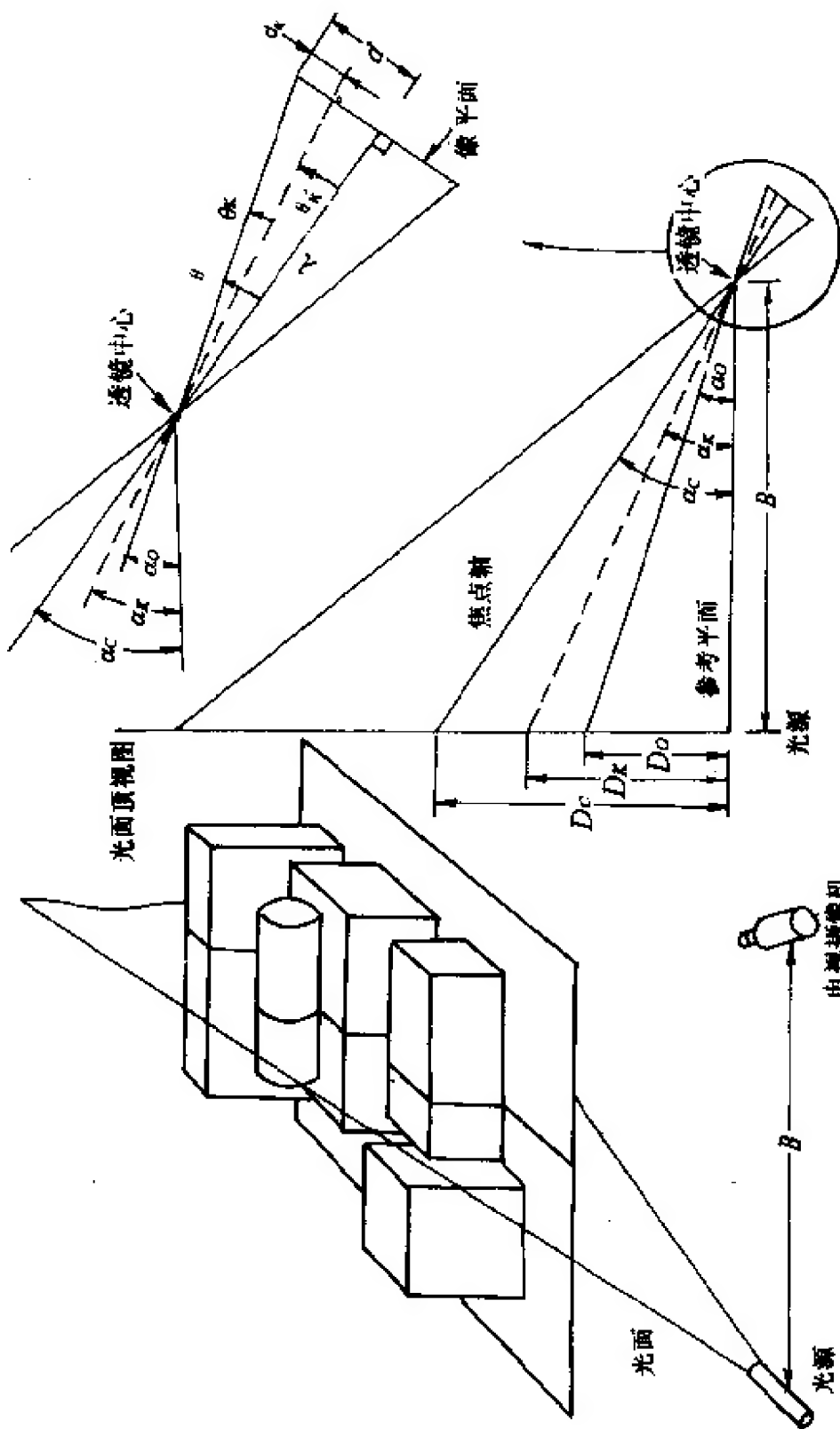
结构光方法是将一种光模式投射到一组物体上,根据模式的畸变计算距离。当前用得最普遍的光模式是由圆柱透镜或窄缝产生的光面。如图 17.2 所示,光面与物体在工作空间相交,产生一光条,用与光源距离为  $B$  的电视摄像机观测。用计算机分析该光条,例如,光条的层析表示表面的改变,断开表示表面之间存在空隙,通过这样的分析即可得到距离。

图 17.2(b)示出图 17.2(a)的顶视图给出简化标定过程的一种特殊配置,系统标定后即可计算出距离值。光源和摄像机置于同一高度,光面垂直于光面原点与摄像机透镜中心的连线,含该直线的垂直平面称参考平面。显然,参考平面垂直于光面,且任何与光面相交的垂直平面形成一垂直光条(见图 17.2(a)),此光条每一点到参考平面的垂直距离都相同。图 17.2(b)所示配置的用途在于使摄像机定位,让每条光都垂直像平面。这样,图像中同一列上的每个点到参考平面的距离也都相同。

基于光面法的大多数系统都使用数字图像。假定被摄像机观测到的图像数字化成一个  $N \times M$  阵列(见 7.2),并令  $y=0,1,2,\dots,M-1$  为该阵列的列标。由下面的讨论可知,标定过程包括测量光源与透镜中心的距离  $B$ ,然后确定角  $\alpha_0$  和  $\alpha_c$ 。一旦这些量为已知,由图 17.2(b)所示基本几何关系,可求得

$$d = \lambda \tan \theta \quad (17.1)$$

式中  $\lambda$  为透镜的焦距,并且



(b) 图 17.2(b) 的顶视图给出的一种特殊配置简化标定过程

(a) 利用结构光法测量距离

图 17.2 结构光方法

$$\theta = \alpha_c - \alpha_0 \quad (17.2)$$

对于一幅  $M$  列的数字图像，每列之间的距离增量

$$d_k = k \frac{d}{M/2} = \frac{2kd}{M} \quad (17.3)$$

式中  $0 \leq k \leq M/2$  (在监视器上所看到的图像中， $k=0$  对应于最左一列， $k=M/2$  时对应中央列)。任意一光条的投影形成的角

$$\alpha_k = \alpha_c - \theta_k' \quad (17.4)$$

式中

$$\tan \theta_k' = \frac{d - d_k}{\lambda} \quad (17.5)$$

或利用式(17.3)得

$$\theta_k' = \tan^{-1} \left[ \frac{d(M - 2k)}{M\lambda} \right] \quad (17.6)$$

上式中  $0 \leq k \leq M/2$ 。对于其余的  $k$  值(即光轴的另一边)，

$$\alpha_k = \alpha_c + \theta_k'' \quad (17.7)$$

式中

$$\theta_k'' = \tan^{-1} \left[ \frac{d(2k - M)}{M\lambda} \right] \quad (17.8)$$

这里， $M/2 < k \leq (M-1)$ 。

比较式 17.6 和 17.8 可以看出， $\theta_k'' = -\theta_k'$ ，因此，对于  $0 \leq k \leq (M-1)$  整个区间，式(17.4)和式(17.7)是一致的。由图 17.2 (b)可知，任意光条与参考平面间的垂直距离  $D_k$  可表示为

$$D_k = B \tan \alpha_k \quad (17.9)$$

式中  $\alpha_k$  由式(17.4)或式(17.2)确定， $0 \leq k \leq (M-1)$ 。

应注意，只要  $B$ ， $\alpha_0$ ， $\alpha_c$ ， $M$  和  $\lambda$  已知，数字图像中列的编号便可完全确定参考平面与成像于该列的光条上所有点之间的距离。因为  $M$  和  $\lambda$  是固定参数，因此，标定过程实际上简化为测量  $B$  和确定  $\alpha_c$  和  $\alpha_0$ 。为确定  $\alpha_c$ ，放置一垂直平面，使其与光面的交线成像在像平面的中央(即位于  $y=M/2$  处)。然后实地测量该表面与参考平面间的垂直距离  $D_c$ 。由图 17.2(b)所示几何关系可知

$$\alpha_c = \tan^{-1} \frac{D_c}{B} \quad (17.10)$$

为确定  $\alpha_0$ , 使表面向参考平面移动直到它的光条成像在像平面上  $y=0$  处为止。然后测量  $D_0$ , 由图 17.2(b) 可知

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \frac{D_0}{B} \quad (17.11)$$

这样便完成了标定过程。

上面讨论的方法的主要优点在于这种距离测量技术比较简单。只要完成了标定过程, 便可利用式(17.9)求得图像上每列所对应距离, 式中  $k=0, 1, 2, \dots, M-1$ , 计算结果存在存储器内。然后, 在正常使用过程中, 只要确定图像中任一点的列标, 并寻找相应存储位置, 就可求得该点的距离。

### 17.3 渡越时间距离探测器

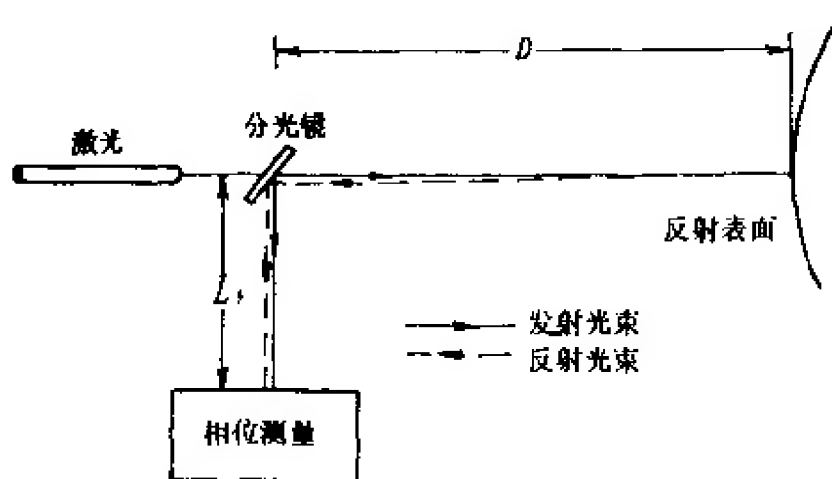
利用渡越时间测量距离的方法有三种, 即测量脉冲光、连续光束和超声从发射到沿原路径从反射面返回所用的时间, 从而确定距离。

#### 17.3.1 利用脉冲光确定距离

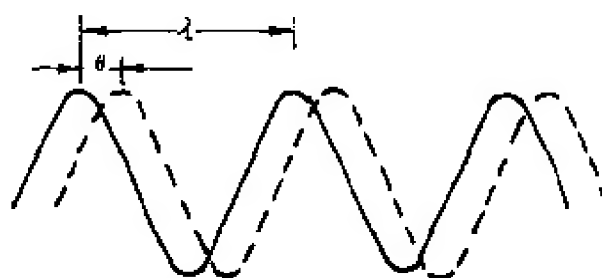
测量光脉冲从发射到沿原路径由反射面返回所用的时间可确定距离。由反射面返回的距离  $D$  与脉冲渡越时间  $T$  和光速  $C$  的关系为  $D=CT/2$ , 因为光速约  $0.3048\text{m/ns}$ , 故欲使距离精度达到  $\pm 6.35\text{mm}$ , 则所使用的电子仪器必须时间分辨率为  $41\text{ps}$ 。

#### 17.3.2 利用连续光束测量距离

利用连续光束测量发射和返回光束间的延迟(即相移)可测量距离, 其工作原理如图 17.3 所示。波长为  $\lambda$  的激光束分为二束光, 一束(称为参考光束)经过距离  $L$  到达相位测量装置, 另一束经过



(a) 相移测距原理



(b) 发射波与反射波之间的平面

图 17.3 连续光束测量距离的工作原理

距离  $D$  到达反射表面。反射光束经过的点距离  $D' = L + 2D$ 。若  $D = 0$ , 则  $D' = L$ , 即参考光束和反射光束同时到达相位测量装置。若  $D$  增大, 则反射光束经过的路径较长, 这样, 在测量点处两光束之间产生相位移, 如图 17.3(b) 所示。在这种情况下,

$$D' = L + \frac{\theta}{360^\circ} \lambda \quad (17.12)$$

可以看出, 若  $\theta = 360^\circ$ , 则两个波形将再次对准, 即根据测得的相位移无法区别  $D' = L, D' = L + n\lambda, n = 1, 2, \dots$ 。因此, 只有  $\theta < 360^\circ$  或  $2D < \lambda$  才有唯一解, 由于  $D' = L + 2D$ , 将此关系代入式 17.12 可得

$$D = \frac{\theta}{360^\circ} \frac{\lambda}{2} \quad (17.13)$$

若波长已知，则上式给出的是以相移表示的距离。

激光波长很短(例如氦氖激光的波长为  $632.8\text{nm}$ )，因此，图 17.3 所示方法对于机器人应用是不实际的。解决这一问题的简单方法是用一个波长大得多的波对激光波调幅(例如，根据  $c=f\lambda$ ，频率为  $f=10\text{MHz}$  的调制正弦波，波长为  $30\text{m}$ )。这种方案示于图 17.4。基本技术同前述方法一样，只是参考信号此时是一个调制函数。调制的激光信号发射到目标，返回光束被解调，然后将它与参考信号比较以确定相移。此时式 17.13 仍然成立，但得到了一种更为实际的波长工作范围。

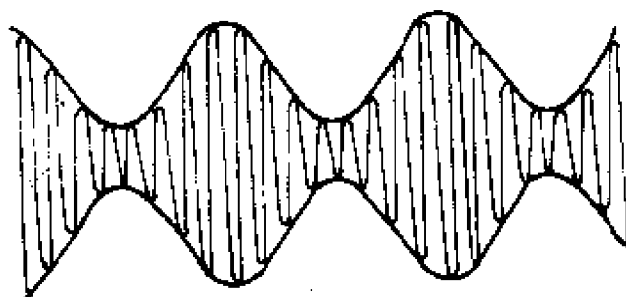


图 17.4 幅值调制波形

与脉冲光方法相比，连续光的主要优点在于，它不但给出距离也同时给出强度信息。但是连续系统需要相当大的功率。上述两种方法测得的距离不很准确，要求对返回信号进行平均以便减小误差。如果将此问题看做是在距离真值上附加了测量噪声，并且假定测量过程是统计独立的，则可以证明平均值的标准偏差为噪声标准偏差的  $1/\sqrt{N}$ ，其中  $N$  为被平均的样本个数。这说明，平均样本数愈大，距离估计的不确定性愈小。

### 17.3.3 利用超声测量距离

超声测距的基本原理与脉冲激光测距相同。发射持续时间很短的超声调频脉冲。由于具体介质的声波传播速度是已知的，所以根据发射脉冲和回波之间的时间间隔，经过简单的计算便可求出到反射表面的距离估计值。例如，Polaroid 公司生产的一种超声

测距系统中，1ms 的超声调频脉冲包含四种频率的 56 个脉冲，这四种频率为 50、53、57 和 60kHz。调频脉冲由直径为 3.6cm 的变换器发射出去。被物体反射的信号由同一变换器接收，并经放大器和其他电路处理，测距范围为 0.27 到 10.6m，精度为 30.48mm 左右。调频脉冲中使用多种频率主要是为了减小信号的互相抵消。这些装置的波束约为 30°。超声测距的分辨率不如前两种，因此，它主要用于引导和避障。

## 第十八章 速度和流速传感器

为了实现操作器的功能,机器人伺服必须使用位置和速度信息。获得机器人控制用速度信息的传感器有直流转速表,以及利用光学编码器和频率—电压变换器获得模拟速度的模拟器件。本章论述获得速度信息的不同技术。

### 18.1 直流转速表

旋转直流电机的轴会产生一个模拟电压,该电压随轴的角速度增加(或减少)而增加(或减少)。因此,电动机实际上是一个直流转速表,可用它测量轴的速度。但是,机器人获取速度信息的直流转速表通常是专门设计的器件,而不是一般直流电机。出现这种情况有多种原因,首先,转速表输出的直流电压不仅跟轴的转速成比例,而且这种输出在整个动态范围有良好的线性度。图 18.1 示出转速表的输出特性,速度低于 100rpm 时会出现一定的容许线性偏差。这种转速表在机器人控制中用作速度传感器。通常,直流电动机产生的电压不具有转速表的线性度。第二个原因是转速表的输出电压没有电压波动,因为波动会使控制器件产生跳动,这是机器人操作器不允许的。通常,直流电动机会产生大的电压波动,故它不能用作机器人速度传感器。第三个原因是转速表的体积小和功耗低,这是直流电动机难于媲美的。

永磁铁-铜电枢转速表的输出特性跟图 18.1 类似。导线在磁场中运动时其两端产生的电压跟导线运动速度、磁场方向和线圈平面之间角度的正弦成比例。当导线平面和磁场互相垂直时,这个角度为  $90^\circ$ ,故产生最大电压。电枢的铜(或铝)线圈纵向卷绕在



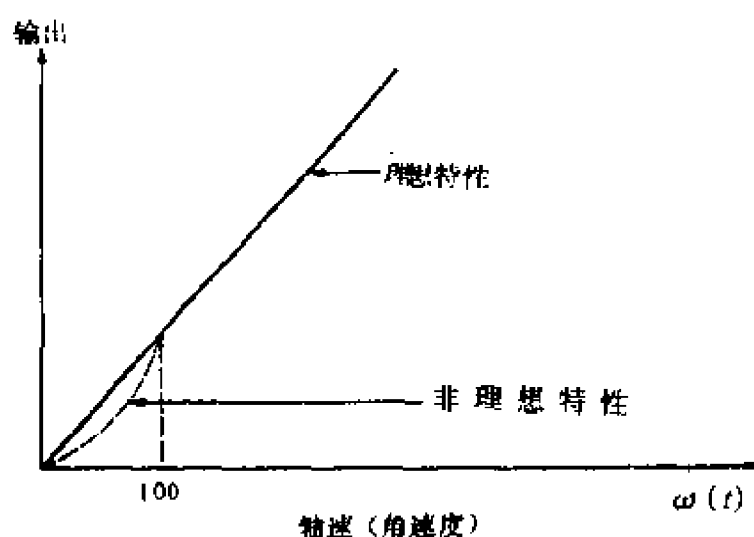


图 18.1 转速表的输出特性

铁的圆筒芯上，如图 18.2 所示。图中线圈端点连接在整流子上，而整流子是由许多整流子片构成的环。图中仅绘出一个线圈，通常圆形截面的周围有相等间隔的许多线圈（如 11 个）。相应的整流子有双倍

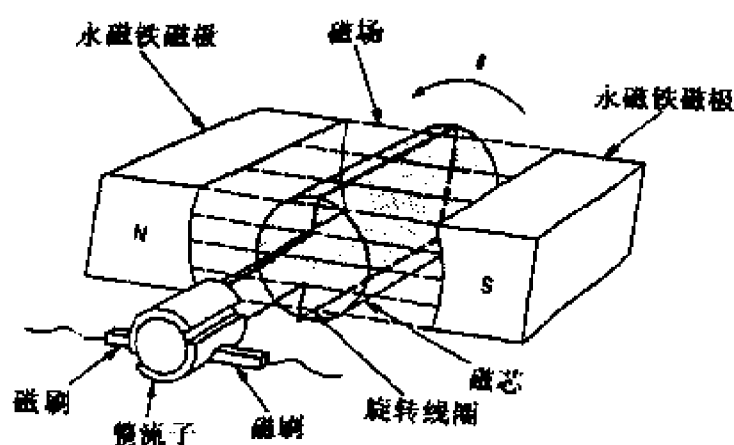


图 18.2 铁芯上设置线圈的模拟转速表

线圈的整流子片。通常，通过二个或四个为一组的电刷实现滑动电接触，而电刷跟整流子的各个整流子片相接触。

根据上述可知“旋转磁铁”转速表的工作过程。任何一个线圈在永久磁场中旋转时，感应电压随角度成正弦变化。这样，在恒速下电压也呈正弦形。电刷（或整流子）通过旋转线圈连接，从而起到整流元件的作用，故产生脉动直流电压。所有电枢线圈都产生相位跟第一个电压的相位不同的正弦电压。因为线圈绕电枢的截面均匀分布，故电刷的电压输出几乎是直流。直流电压中出现

的少量交流成分称波动，通常为 3~5%。

电枢用活动线圈的器件可替代上述旋转磁铁。这种器件采用一种中空“杯”大幅度地降低重量。通过除去电枢的铁，可减少这种转速表的电感，并使脉动电压比旋转磁铁的脉动电压小得多，约为直流输出典型值的 1%。活动线圈器件还可用更多的线圈，故其低速特性比旋转磁铁的更好。

工业机器人用的模拟转速表是 SCARA<sup>[3]</sup>，使用这种转速表的机器结构不需要抵抗重力被提升的致动器。SCARA 的主轴垂直于重力场移动，故转速表添加的重量不会对伺服电动机或机械手机械结构产生重大的附加负担(即转矩负载)。但是，电动机需要逆重力移动，故为了获得速度信号，通常采用微分技术。

## 18.2 用光学编码器测量速度

监控轴转速的光学编码器技术有两种，一是利用编码器和频率-电压变换器(FVC)获得跟轴转速成比例的模拟电压，其特性跟直流转速表类似。二是编码器跟软件结合，从而获得轴转速的数字表示，现在大部分机器人均是利用光学编码器产生数字位置和速度信息。

### 18.2.1 编码器和频率-电压变换器

光学增量型编码器产生的 TTL 脉冲可用于监控位置。根据速度的基本定义(即速度是位置变化的速率)可由位置信息获得速度信息。因此，若周期性地观察到编码器的脉冲数，并将这种脉冲转换成直流电平，则所产生的信号实际上跟轴的转速成比例。这种关系可通过  $\Delta x / \Delta t$  表示，其中  $\Delta t$  是采样间隔(或周期)， $\Delta x$  是在此时间间隔内产生的 TTL 脉冲数。

完成上述任务的器件称频率—电压变换器(FVC)。这种先进集成电路技术的产品接收 TTL 编码器脉冲的通道和利用它本身

内部产生的钟脉冲通道，在每个钟脉冲循环期间计数这些脉冲。然后，二进制计数输出到一个内部 DAC，该 DAC 产生跟编码器圆盘转速和电动机轴转速成比例的直流电压。图 18.3 示出模拟器件 AD451 的方框图，是 FVC 的一个实例。该装置输出 0~5V，对应的脉冲重复率是直流到 10kHz (AD453 达到 100kHz)。

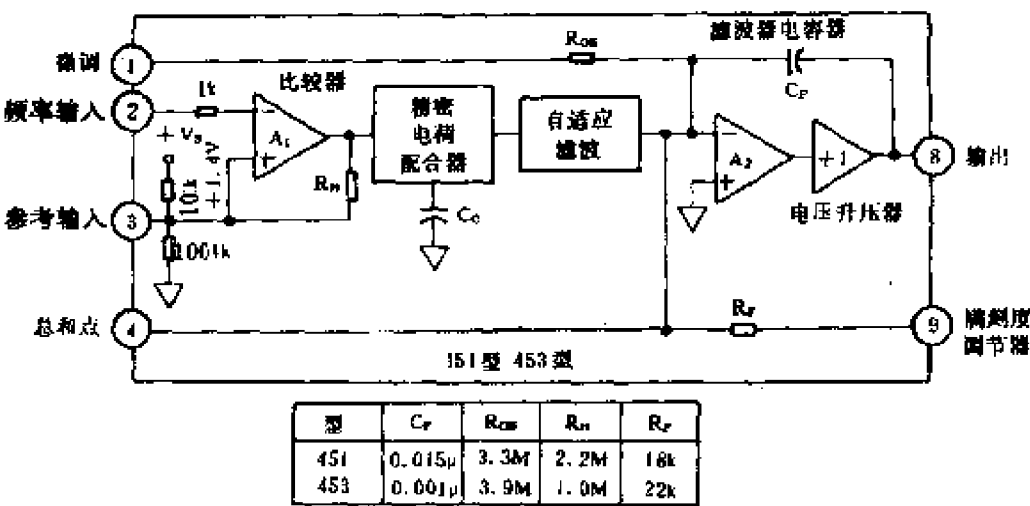


图 18.3 频率-电压变换器方框图

这种器件跟模拟转速表相比，首先，FVC 输出的波动更小，且波动的性质不同。内部 DAC 产生一个取决于其变换率的逐段恒定输出，该输出的周期很小，以致 FVC 在大部分应用中的输出呈连续性。因此，用 FVC 时，不像模拟转速表那样需要低通滤波器。其次，跟转速表相比，FVC 的延迟时间更长，精确度决定于内部钟脉冲速率。在高性能系统中，如要求有大带宽伺服的半导体线连接器，这种延迟会产生稳定性问题，必须用附加补偿来处理。但是，用于控制机器人关节的伺服，延迟引起的额外相位滞后通常不是由于小带宽造成的。

FVC 未广泛用于机器人系统的原因，一是其价格约 50 美元，和模拟转速表一样昂贵。二是包括数字位置和模拟速度的混合伺服不是常用的方法。机器人系统中通用的是纯数字伺服。

### 18.2.2 编码器和软件

如上所述,采用增量型编码器通过处理位置数据可获得速度信息。一种简单方法是由 $\Delta x/\Delta t$ 给出近似速度,而不是像 FVC (频率-电压转换)情况那样用一个专用芯片完成操作。假定每  $T$  秒内更新位置(即读出编码器计数),则可用下面的计算机算法:

- (1)读出和存储通过的编码  $P(kT)$ ;
- (2)恢复以前的编码计数  $P((k-1)T)$ (这是早  $T$  秒的位置);
- (3)由下式给出近似速度

$$V(kT) = \frac{P(kT) - P((k-1)T)}{T};$$

- (4)增加  $k$  和重复 1~3 步骤。

这种算法容易编码,并且只需要很短的操作时间。但是,这种算法是基于导数的一阶近似,故不适合在某些领域应用。在这个实例中必须用二阶或更高阶近似。应注意的是,这样做会延长完成时间和在数字伺服环路中引进附加的相位滞后。因此,为了稳定系统,需要加额外的补偿。

在算法中选择更新时间  $T$  十分重要。该值过大会导致违背采样定理,从而使实际速度和  $V(kT)$  之间出现大的误差。该值过小因为位置计数变化小,故意味着算法的低速特性差。

## 18.3 流速传感器

流速传感器亦是测量速度的一种器件,这种器件主要用于获取气体或液体的流速信息。这里介绍几种类型的机器人用流速传感器。

### 18.3.1 涡轮式流速传感器

检测气体或液体流速的涡轮式流速传感器如图 18.4 所示。涡

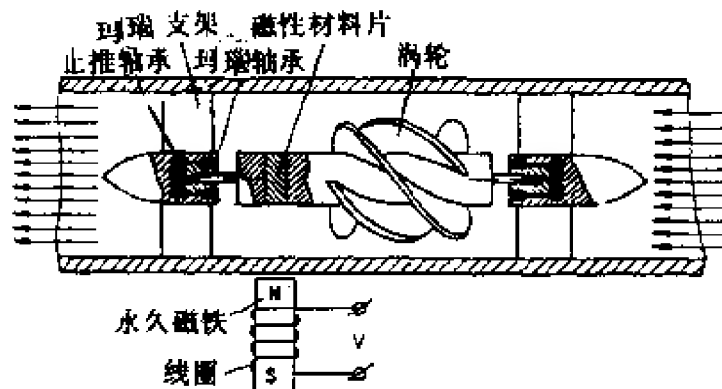


图 18.4 涡轮式流速传感器

轮在玛瑙轴承中旋转，轴承装在管内部的支架上。轴向位移由玛瑙止推轴承限制。管子和涡轮用非磁性材料制作。磁性材料片设置在涡轮轴的一侧。管子外侧装有永久磁铁和围绕永久磁铁的线圈。旋转过程中涡轮轴转动磁性材料片，于是，磁通量随磁性材料片相对于永久磁铁的位置而变化，从而产生频率为涡轮转速两倍的交流电动势。涡轮转速(有小的损耗)跟流体的单位动能  $W$  成正比，该动能可由下式表述：

$$W = \frac{\rho V^2}{2}$$

式中  $\rho$  是流体密度， $V$  是流体速度。流体速度乘以管子的截面积则可得流速率。这种流速传感器的精度为  $1 \sim 0.3\%$ 。

### 18.3.2 热流速传感器

为了克服涡轮滑动造成的负效应，并提高测量精度，流速传感器需要消除可动机械部件。图 18.5 示出的热流速传感器无可动机械部件。管子作为外壳，并装有加热器。流体或气体到达加热器之前的温度为  $t_0$ ，流过加热器的流体温度升到  $t_0 + \Delta t_0$ 。这两个温度均分别由两个热敏电阻记录，热敏电阻跟固定电阻  $R$  构成电桥。对于不同质量流量的气体，以一定温度增量 ( $\Delta t$ ) 给气体加热时，必须由加热器供给不同量的热能。电桥不平衡时出现的电压

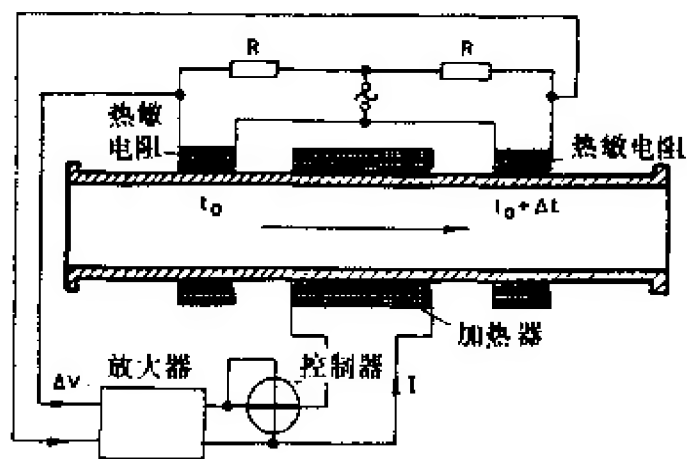


图 18.5 热流速传感器

$\Delta V$  通过放大器放大, 控制器改变馈给加热器的加热电流。电流  $I$  的值指示流速。这种装置可测量每小时几千立方米的流速与流量, 精度为  $1\sim 2\%$ 。

为了提高器件的灵敏度, 并使其能用于测量快速变化的流速, 热敏电阻的质量必须很小, 以便减小热惯性。图 18.6 示出这种热敏电阻器的原理图。基座由低热导率的材料制作, 其上涂一层厚  $1\mu\text{m}$  的  $0.2\times 1\text{mm}$  铂膜, 膜上设置引线, 膜平面垂直于流速矢量。这种传感器能响应高达  $100\text{kHz}$  的快速流量变化。

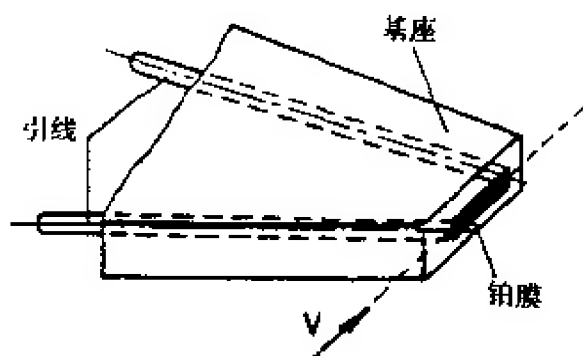


图 18.6 用于流速传感器的高灵敏度热敏电阻器

### 18.3.3 正位移式摆动圆盘流量计

正位移装置构成一种特殊类型的流量计，图 18.7 示出的摆动圆盘流量计是其中的一种。图中外壳包含相对于球形支架中心可摆动的圆盘。圆盘有一个含隔板壁的裂口，入口和出口分别位于隔板壁的两边。球形支架有一根扣针，圆盘摆动时扣针跟踪圆锥。通过机械或电监控这种运动，则可测流速。由进口流入装置的部分流体（或气体）被隔板壁、外壳和倾斜的摆动圆盘限制。流体（或气体）为了继续前进而推动圆盘，直到初始部分到达出口为止。因此，摆动圆盘旋转一次则放出一定容积的流体（或气体）。显然，这种容积很容易由装置的几何形状计算出来。实际上，流体（或气体）容积和摆动圆盘之间有滑动，故圆盘和外壳之间的泄漏造成一定误差。

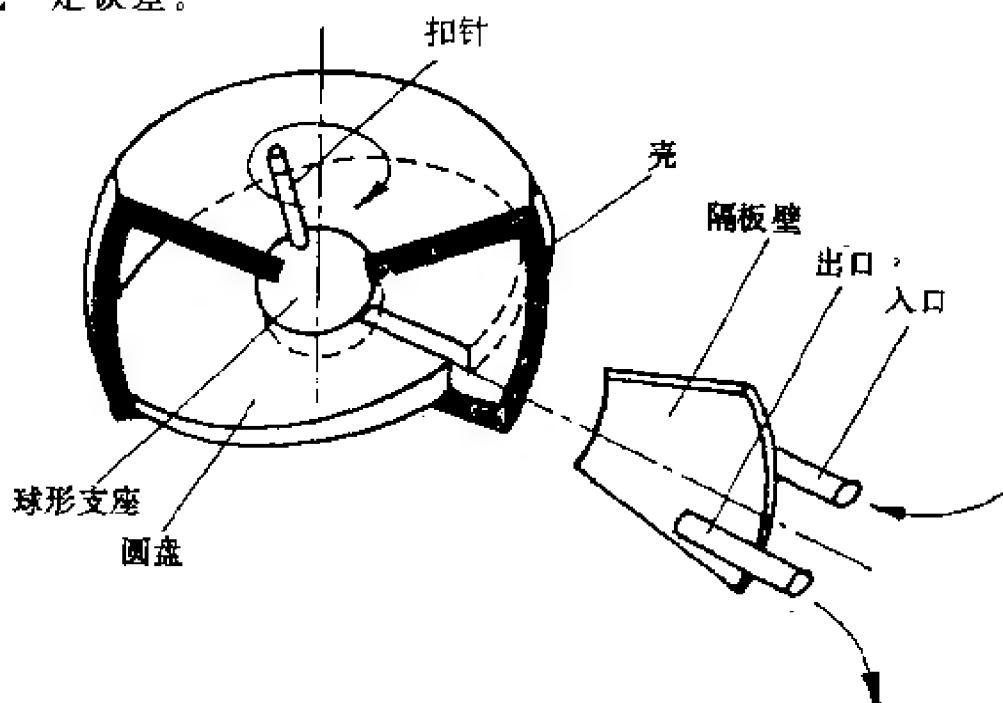


图 18.7 正位移式摆动圆盘流量计

## 第十九章 线加速度传感器

机器人除了需要监控惯导系统和关节的速度与位置外,还需要监控惯导系统和关节的加速度。通常角加速度通过微分角速度获得,但线加速度通过测量获得,因为微分速度获得的线加速度不够精确(相反,积分线加速度得到的速度和距离值很精确)。

### 19.1 线加速度传感器的原理

检测运动体线加速度依据的共同原理是运动学的牛顿第二定律,这种检测方法是将检测有一定质量的物体的加速度归结为检测力或力矩。

若在运动体重心沿纵轴方向固接一质量  $m$ ,则运动体相对于某惯性坐标系以加速度  $a$  向前运动时,运动体将给质量  $m$  以向前运动的力  $F$ ,此作用力  $F$  与质量  $m$  的惯性力  $Fa$  相等,而方向相反,即

$$F = Fa = ma$$

因此,质量  $m$  一定时,可通过检测运动体施加于质量  $m$  上的力来确定运动体相对于惯性空间的加速度。质量  $m$  是通过弹簧与运动体相连接的,惯性力  $Fa$  将与弹簧的反作用力平衡,并表现出一定的位移,因此,通过检测该位移也可确定加速度  $a$ 。

因为检测加速度的系统感受的是沿运动体某一轴向的加速度,因此,若要想检测运动体三个轴向的加速度,则必须用三个加速度检测系统。若要确定运动体相对地面上某一固定点的加速度,则必须考虑地球相对于惯性空间的运动加速度,以使用它修正所检测到的加速度值。



运动体过载加速度检测系统的敏感轴安装在运动体的轴向。在一般惯性制导系统中,加速度检测系统的敏感轴根据所选择的直角坐标系的三个方向安装,如按地球的东西、南北和铅垂三个方向安装。为保证整个飞行过程中三个加速度检测系统的敏感轴方向不变,必须采用方向稳定性很好的稳定平台。捷联式惯性制导系统中,沿飞行器三个轴向安装检测系统的敏感轴。

## 19.2 线位移式加速度传感器

简单线位移式加速度传感器由敏感质量( $m$ )、阻尼器( $C$ )、有线性特性的弹簧( $k$ )和基座组成,基座安装在运动体上,如图 19.1 所示。基座在惯性空间运动时,质量  $m$  沿  $X-X$  方向作相对于惯性空间和基座的运动。若不考虑重力加速度的作用,并设  $x_i$  为基座相对于惯性空间(惯性参考系统)的位移,  $x$  为质量  $m$  相对于惯性空间的位移,则  $y = x - x_i$  代表质量  $m$  相对于基座的位移。

忽略质量  $m$  运动时的摩擦,并假设质量  $m$  的敏感轴与惯性参考系的某坐标轴平行,根据牛顿第二定律可得系统的运动方程

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{x}_i) + k(x - x_i) = 0 \quad (19.1)$$

若以质量  $m$  相对于基座的位移表示,则

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{x}_i$$

或

$$\ddot{y} + \frac{c}{m}\dot{y} + \frac{k}{m}y = -\ddot{x}_i \quad (19.2)$$

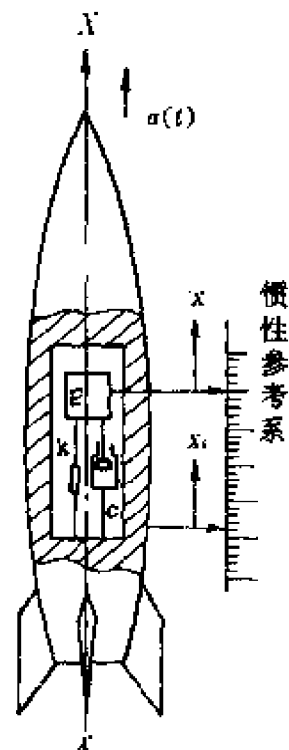


图 19.1 线位移式加速度传感器示意图

式中  $\ddot{x}_i$  是基座相对于惯性参考系的加速度  $a(t)$ 。

若用典型二阶测量系统的符号,则上式可写成

$$\ddot{y} + 2\zeta\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = -\ddot{x}_i \quad (19.3)$$

式中  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  是测量系统的固有频率;

$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$  是测量系统的阻尼比;

$\ddot{x}_i$  是测量系统的输入量(被测加速度);

$y$  是测量系统的输出量(质量  $m$  相对于基座的位移)。 $a$  输入量按正弦规律变化时,即

$$x_i = x_{i0}e^{j\omega t}$$

$$\dot{x}_i = j\omega x_{i0}e^{j\omega t}$$

$$\ddot{x}_i = a_0 e^{j\omega t} = j^2 \omega^2 x_{i0} e^{j\omega t} = -\omega^2 x_{i0} e^{j\omega t}$$

则实际输出量  $y$  可由上述方程解得

$$\begin{aligned} y &= \frac{-a_0}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} e^{j(\omega t + \Delta\varphi)} \\ &= \frac{-a_0/\omega_n^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} e^{j(\omega t + \Delta\varphi)} \end{aligned} \quad (19.4)$$

稳态时的输出幅值为

$$|y_m| = \frac{|-a_0/\omega_n^2|}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

幅频特性为

$$A(\omega) = \left| \frac{y_m \omega_n^2}{a_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (19.5)$$

相频特性为

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1} \left[ \frac{-2\zeta\omega/\omega_n}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right] - \pi \quad (19.6)$$

相对幅值误差为

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} - 1 \quad (19.7)$$

相角差为

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{-2\zeta\omega/\omega_n}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right] \quad (19.8)$$

相角和相角差相差  $\pi$  的物理意义可由图 19.2 所示旋转向量图来说明。由于输入加速度  $(\ddot{x}_i = -\omega^2 x_{i0} e^{j\omega t})$  的方向与输入位移  $(x_i = x_{i0} e^{j\omega t})$  的方向相反, 因此, 输入位移指向实轴右方时, 输入加速度指向实轴左方。同时, 由于输出量(位移  $y$ ) 与输入加速度方向相反, 所以, 理想的输出量  $y_d$  应与输入加速度相位相差  $180^\circ$ , 并指向实轴右方。由于实际输出量(位移  $y$ ) 与理想输出量  $y_d$  有一负的相角差  $\Delta\varphi$ , 所以实际输出量  $y$  的相角为负值, 也只有在  $\varphi = \Delta\varphi - \pi$  时,  $y$  的相角才能为负值。此时将输入加速度看成落后于理想输出量  $180^\circ$ , 并认为输入加速度(相对于理想输出量)具有正的相位。

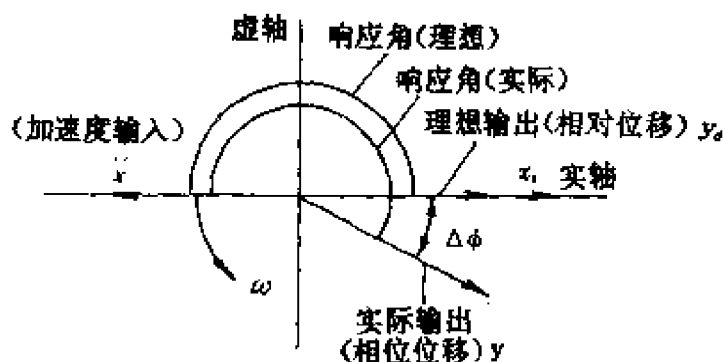


图 19.2 检测加速度时的旋转向量图

在上述情况下,理想输出量  $y_d$  相对于输入加速度具有  $(-\pi)$  的相角差,因此,实际输出量与理想输出量之间的相角差  $\Delta\varphi =$  实际输出量的相角减理想输出量的相角,即

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \tan^{-1} \left[ \frac{-2\zeta\omega/\omega_n}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right] - \pi - (-\pi) \\ &= \tan^{-1} \left[ \frac{-2\zeta\omega/\omega_n}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right]\end{aligned}$$

可以看出,其幅频特性和相频特性与典型二阶系统相同,只是在相角上相差  $(-\pi)$ 。

系统的传递函数可写成下述三种形式

$$\begin{aligned}W(S) &= \frac{Y(S)}{S^2 x_i(S)} = \frac{-1}{S^2 + \frac{c}{m}S + \frac{k}{m}} \\ &= \frac{-T^2}{T^2 S^2 + 2k\zeta TS + 1} = \frac{-1}{S^2 + 2k\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \quad (19.9)\end{aligned}$$

式中  $T = \frac{1}{\omega_n}$  是测量系统的时间常数。

稳态时,运动体相对于惯性空间的加速度可写成

$$\ddot{x}_{i0} = a_0 = -\frac{k}{m}y_c = -\frac{k}{m}x_{i0}$$

所以,质量  $m$  相对于基座的位移(稳态值)为

$$y_c = -\frac{m}{k}a_0 = -\frac{a_0}{\omega_n^2} \quad (19.10)$$

上式即为简单(开环)加速度测量系统的静态特性方程,式中负号表示输出量(位移)与被测加速度的方向相反(相位差  $180^\circ$ )。测量系统的静态灵敏度为

$$S_c = \frac{m}{k} = \frac{1}{\omega_n^2} \quad (19.11)$$

可以看出,上述加速度传感器具有典型二阶测量系统的传递函数,因此,利用前述结论可以对这种简单的加速度测量系统的性

能与其参数之间的关系加以分析,并可得到以下结论:

(1) 传感器的灵敏度与敏感质量  $m$  成正比,与系统的弹簧刚度  $k$  成反比,亦即与系统的固有频率  $\omega_n$  的平方成反比。欲取得较大的静态灵敏度,应选取较大的质量  $m$  和较小的弹簧刚度  $k$ ,使系统具有较小的固有频率  $\omega_n$ 。

(2) 为使传感器有较高的静态精度和线性度,在全量程内,质量  $m$ 、弹簧刚度  $k$  应保持不变,或具有极小的误差。这不仅要求  $m$  和  $k$  在较大的温度变化范围内性能变化极小,而且要求弹簧刚度  $k$  在大位移(大加速度)时,也具有较好的线性度。显然,金属弹性元件难于达到这一要求。所以,这种简单加速度传感器难满足小灵敏限、大测量范围(如  $10^{-5} \sim 20g$  甚至更宽)的加速度测量要求。

(3) 这种简单开环加速度测量系统的阻尼比  $\zeta$  较大时,会使过渡过程的上升时间增大,或者使频带变窄。但阻尼比太小又会使动态误差增大,因此,应根据动态误差(超调误差或相对幅值误差)的要求,选择最佳阻尼比。

(4) 为了得到较宽的频带以减小动态误差,在选定合适的阻尼比的情况下,应选取较大的固有频率  $\omega_n$ 。但是,考虑振动干扰的影响和满足静态灵敏度的要求,系统的固有频率  $\omega_n$  应远小于干扰振动频率,以使活动系统对干扰振动具有较低的灵敏度。

### 19.3 摆锤式加速度传感器

摆锤式加速度传感器在运动体加速度测量中应用非常广泛,其以单摆效应为基础,通过测量摆锤的偏转角来测量线加速度。图 19.3 示出的摆锤式加速度传感器由质量为  $m$  的摆锤、阻尼器  $c$ 、反作用弹簧  $k$  及固装在运动体框架上的基座组成。

为了简化摆锤式加速度传感器的数学模型,假设摆杆的分布质量集中在摆锤上,摆锤起始平衡位置位于  $o-o$  垂线,加速度方向如图所示。基座随运动体相对惯性空间运动时,单摆的运动微分方

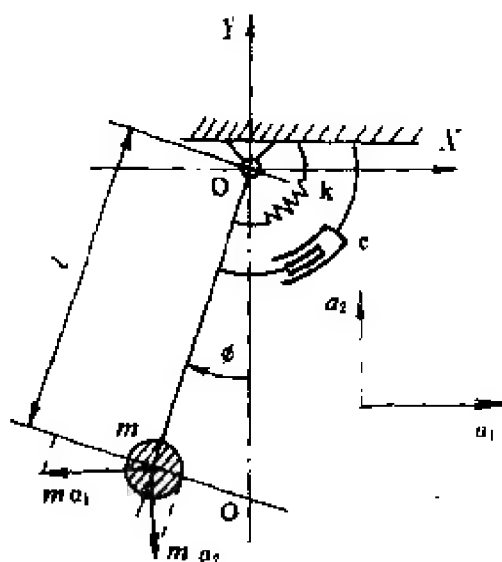


图 19.3 摆锤式加速度传感器的原理结构图

程可写成

$$J\ddot{\varphi} + c\dot{\varphi} + k\varphi = mla_1\cos\varphi - mla_2\sin\varphi \mp M_f \quad (19.12)$$

式中  $J$  是质量  $m$  对旋转中心  $o$  的转动惯量；

$\varphi$  是单摆相对起始位置的偏离角度；

$c$  是阻尼系数；

$k$  是弹簧刚度；

$M_f$  是摩擦力矩。

$a_1, a_2$  是质量沿两个敏感轴的加速度。 $\varphi$  很小时,  $\sin\varphi \approx \varphi, \cos\varphi \approx 1$ , 则上式可写成

$$J\ddot{\varphi} + c\dot{\varphi} + k\varphi = mla_1 - mla_2\varphi \mp M_f$$

或

$$\ddot{\varphi} + \frac{c}{J}\dot{\varphi} + \frac{k + mla_2}{J}\varphi = \frac{mla_1}{J} \mp \frac{M_f}{J} \quad (19.13)$$

典型形式如下

$$\ddot{\varphi} + 2\zeta\omega_n\dot{\varphi} + \omega_n^2\varphi = \frac{ml}{J}a_1 \mp \frac{M_f}{J} \quad (19.14)$$

式中  $\omega_n = \sqrt{\frac{k + mla_2}{J}}$  是传感器的固有频率；

$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{(k+mla_2)J}}$  是传感器的阻尼比。

摆锤式加速度传感器也是一个典型的二阶系统,其固有频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\zeta$  与  $a_2$  有关。当  $a_2=0$  时,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad (19.15)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{kJ}} \quad (19.16)$$

稳态时,  $\dot{\varphi} = \dot{\varphi} = 0$ , 则

$$\varphi = \frac{mla_1 \mp M_f}{k + mla_2} \quad (19.17)$$

由上式可知,当传感器的  $m$ ,  $l$  和  $k$  为确定值时,单摆的偏转角  $\varphi$  不仅与被测加速度  $a_1$  有关,而且与摩擦力矩  $M_f$  和其他方向的加速度  $a_2$  有关。 $a_2$  是包括重力加速度在内的不需要感受的加速度,被视为有害加速度。 $M_f$  和  $a_2$  一般是变量。下面研究有害加速度  $a_2$  和摩擦力矩  $M_f$  对测量精度的影响。

#### (1) $a_2$ 的影响

如果略去  $M_f$ , 则式(19.17)变为

$$\varphi_1 = \frac{ml}{k + mla_2} a_1 \quad (19.18)$$

不存在有害加速度  $a_2$  时,单摆偏转角为

$$\varphi = \frac{ml}{k} a_1 \quad (19.19)$$

$a_2$  引起的角度误差为

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi$$

相对误差为

$$\xi = \frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{\varphi_1}{\varphi} - 1$$

即

$$\xi = -\frac{1}{\frac{k}{mla_2} + 1} \quad (19.20)$$

由式(19.19)可知,单摆系统的静态灵敏度

$$S_c = \frac{ml}{k} \quad (19.21)$$

则

$$\xi = -\frac{1}{\frac{1}{S_c a_2} + 1} \quad (19.22)$$

由上式可见,若要减小有害加速度的影响,则应增大弹簧的刚度  $k$ , 减小  $ml$  值,也就是要减小传感器的灵敏度  $S_c$ , 即应使单位加速度作用下产生的单摆转角越小越好。显然,这将对角度的测量和变换提出很高的要求。

## (2) $M_f$ 的影响

如果忽略  $a_2$ , 则式(19.17)变为

$$\varphi = \frac{mla_1 \mp M_f}{k} = \frac{mla_1 - |M_f|}{k} \quad (19.23)$$

$mla_1 < |M_f|$  时,即当被测加速度产生的惯性力矩小于摩擦力矩时,敏感质量实际上不会运动,传感器没有输出( $\varphi=0$ )。可见,摩擦力矩限制了传感器的灵敏限。如果要求传感器具有较小的灵敏限和感受较小的加速度,则摩擦力矩也应很小,否则必须增大质量  $m$  和摆长  $l$ 。

例如:某典型摆锤式加速度传感器的敏感质量  $m=5\text{g}$ , 摆长  $l=5\text{mm}$ , 要求能测量的最小加速度  $a_{\min}=1 \times 10^{-4}\text{m/s}^2$  (约合  $1 \times 10^{-5}\text{g}$ ), 试求传感器允许的最大摩擦力矩  $M_{fm}$ 。

最大摩擦力矩可根据  $mla_{\min} > M_{fm}$  条件计算,即

$$M_{fm} \leq mla_{\min} = 5 \times 10^{-2}\text{kg} \times 5 \times 10^{-2}\text{m} \times 10^{-4}\text{m/s}^2$$

$$M_{fm} \leq 2.5 \times 10^{-9}\text{N} \cdot \text{m}$$

这么小的摩擦力矩用具有干摩擦的支承方法很难达到。

$mla_1 > |M_f|$  时,摩擦力矩引起的附加偏转角(摩擦误差)为

$$\Delta\varphi = \frac{|M_f|}{k} \quad (19.24)$$

其相对误差为



$$\xi = \frac{|M_f|}{mla_2} \quad (19.25)$$

以附加偏转角  $\Delta\varphi$  表示摩擦力矩  $M_f$ , 并以  $k = \omega_n^2 J$  代入式 (19.14) 时, 传感器的动特性可写成

$$\ddot{\varphi} + 2\xi\omega_n\dot{\varphi} + \omega_n^2\varphi = \frac{ml}{J}a_1 + \omega_n^2|\Delta\varphi| \quad (19.26)$$

由上式可见, 要减小摩擦力矩造成的有害影响, 可减小传感器的固有频率  $\omega_n$ 。但是, 过小的  $\omega_n$  会使传感器的动态性能变坏、频带变窄、动态误差增大和响应时间增长。

## 19.4 液体摆式加速度传感器

轴承有较大的静摩擦力矩, 采用普通轴承支承加速度传感器的摆质量限制了加速度传感器的灵敏度, 只有当输入加速度大于一定量值时, 作用在摆上的惯性力矩才能克服轴承的摩擦力矩, 使摆开始旋转。为了提高摆式加速度传感器的精度, 发展了静压气体悬浮技术、静电悬浮技术、液体悬浮技术和挠性支承技术。

液浮支承是在密封壳体内, 使摆组件悬浮在惰性液体中, 并使摆组件在液体中所受到的浮力与摆组件的重力相等。摆组件在液体中处于全浮状态, 从而使支承处所受之负荷接近于零, 在理论上可达到无摩擦力矩。为了保证摆组件在浮液中得到足够的浮力及稳定其重心和浮心, 摆组件一般均做成质量不平衡的空心筒形。同时, 为了使摆组件相对于壳体的中心定位, 还采用摩擦甚小的宝石支承, 或无干摩擦的弹性、磁性等支承。

液浮支承所用的浮液密度应足够大, 以保证在获得足够的浮力条件下, 减小摆组件的体积和重量。同时, 浮液的粘度要适当, 既要保证能取得良好的动态稳定性 (具有适当的阻尼效应), 又要使系统具有较小的时间常数。图 19.4 示出两种典型液浮摆式加速度传感器的结构示意图。

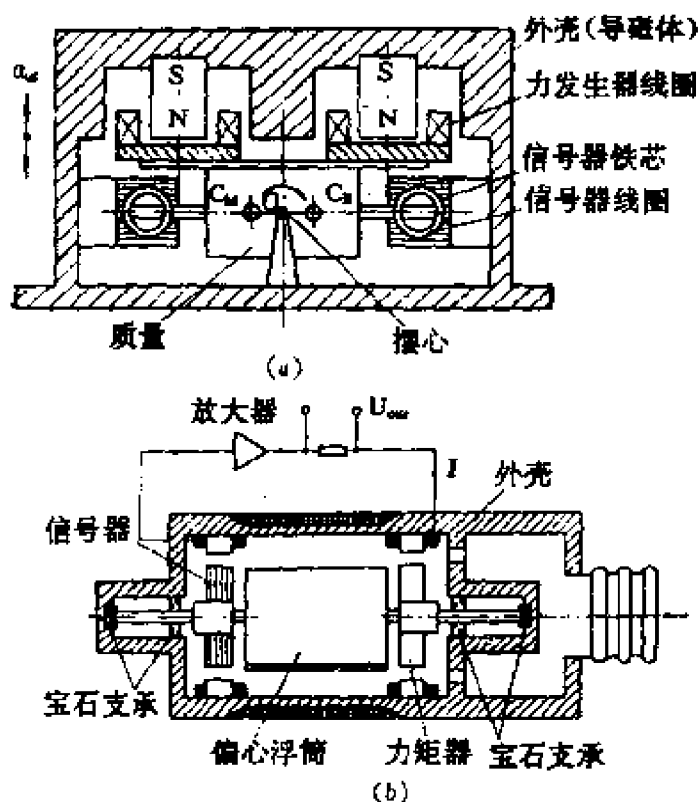


图 19.4 典型液浮摆式加速度传感器

## 19.5 金属挠性加速度传感器

金属挠性加速度传感器的基本工作原理仍是牛顿第二定律，其结构原理如图 19.5 所示<sup>[12]</sup>。当加速度沿传感器敏感方向作用时，惯性力使金属挠性杆支承的检测质量摆偏离中心位置。信号传

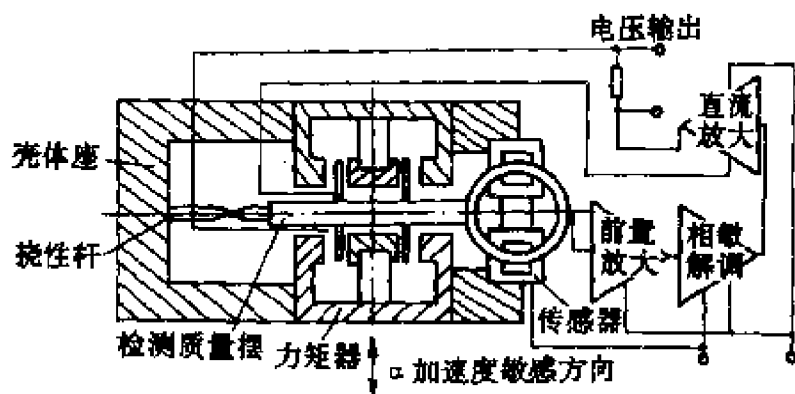


图 19.5 金属挠性加速度传感器的结构原理图

传感器感受检测质量摆的偏离角并输出与其成比例的电压信号,该信号经前置放大,相敏解调和直流放大等构成的伺服电路,从而输出与输入加速度成比例的直流电流。直流电流再反馈到力矩器驱动线圈,该回路称之为再平衡回路,从而产生一恢复力矩,恢复力矩与输入加速度引起的惯性力矩相平衡。直流电流的极性表示加速度的方向,直流电流的大小与输入加速度的大小成比例。

和液体摆式加速度传感器相比,金属挠性加速度传感器无支承摩擦力矩,故可获得高精度。此外,这种传感器还有环境温度变化对精度影响小、结构简单、摆的体积小、转动惯量小、时间常数小、动态性能好和成本低等优点。典型金属挠性加速度传感器的主要性能如下:

动态范围	$\pm 20g$
偏 值	$\leq 1 \times 10^{-3}g$
标度因数	$1.4 \pm 0.1mA/g$
二次项非线性	$\leq 50\mu g/g^2$
阈 值	$< 1 \times 10^{-5}g$
分 辨 率	$< 1 \times 10^{-5}g$
逐次通电重复性	$\leq 5 \times 10^{-4}g$
阻尼系数	$0.2 \sim 0.5$
工作频率	$250Hz$
滞 环	$\leq 1 \times 10^{-4}g$
噪声电压	$\leq 20mV$

## 19.6 石英挠性加速度传感器

石英挠性加速度传感器实际上是一种机械摆式加速度计,其挠性杆和电容传感器构成一体,故结构简单,有精度高、功耗小和体积小等优点。这种加速度传感器既是惯导系统的理想部件,又可广泛用于工业监测系统、石油钻井的随钻测斜系统、水库大坝或建

筑工程的测斜系统。

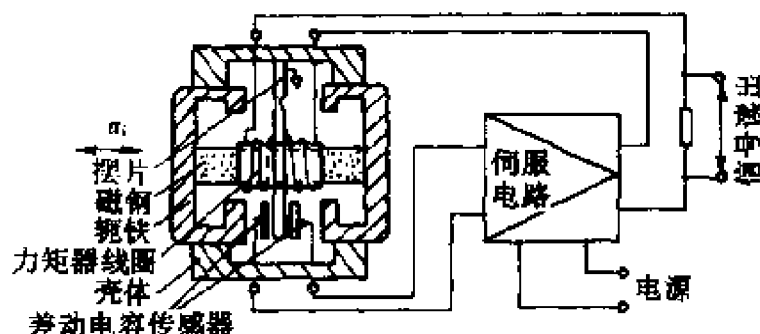


图 19.6 石英挠性加速度传感器的结构原理图

石英挠性加速度传感器的结构原理如图 19.6 所示。敏感头由挠性支承摆组件(其上装有力矩器线圈)、力矩器、差动电容传感器(由摆片与轭铁的上下磁结构组成)和阻尼器(由力矩器线管与磁钢之间的空隙及力矩器线管与其外侧的轭铁之间的空隙形成,通过空气阻尼)等组成。

沿加速度传感器的输入轴方向有加速度  $a_i$  作用时,摆组件发生微小偏转,则差动电容传感器两臂的电容量发生变化,伺服放大器检测这一变化并变换成相应的输出电流反馈给力矩器,该电流  $i$  的大小与输入加速度  $a_i$  成正比,而极性有使摆组件返回到原来位置的倾向。在力平衡状态下

$$p a_i = k_{tg} i \quad (19.27)$$

$$i = p a_i / K_{tg} \quad (19.28)$$

由于摆性  $p$ (即  $mL$ )和力矩器的力矩系数  $K_{tg}$ 是已知的,故测出流过力矩器的电流  $i$  便可知道输入加速度  $a_i$ 。比例系数  $p/K_{tg}$ 称为标度因数,其数值等于单位加速度输入时所需的再平衡电流,亦称自重电流。

石英挠性加速度传感器的原理方框图如图 19.7 所示,系统的输入输出特性

$$i(s)/a_i(s) = \frac{pK/K_{tg}}{Js^2 + Ds + K + K_e}$$

$$\approx \frac{pK}{K_{tg}J} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (19.29)$$

式中  $K$  是伺服回路刚度 ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ ),  $K = k_p K_{ss} + K_{tg}$ ;

$\omega_n$  是回路的固有频率 ( $\text{rad}/\text{s}$ ),  $\omega_n = \sqrt{(K_c + K)/J}$ ;

$\xi$  是回路的阻尼比 (无量纲),  $\xi = \frac{D}{2\sqrt{(K_c + K)J}}$

$J$  是摆组件转动惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ );

$p$  是摆性 ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{g}$ )。

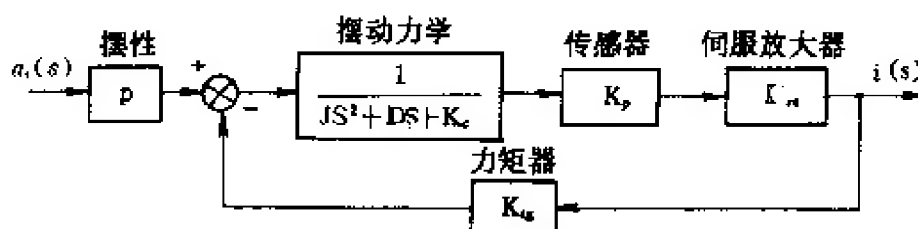


图 19.7 石英挠性加速度传感器的原理框图

将式(19.29)进行拉氏变换, 可得伺服回路对阶跃输入的时域响应:

当  $0 \leq \xi < 1$  时

$$i(t) = \frac{\omega_n}{1 - \xi^2} \exp(-\xi\omega_n t) \sin(\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} t) \quad (t \geq 0)$$

当  $\xi = 1$  时

$$i(t) = \omega_n^2 t \exp(-\omega_n t) \quad (t \geq 0)$$

当  $\xi > 1$  时

$$i(t) = \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \exp[-(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t] - \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}}$$

$$\times \exp[-(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t] \quad (t \geq 0)$$

在  $pK/JK_{tg} = 1$  的情况下,  $i$  与  $t$  的关系如图 19.8 所示。

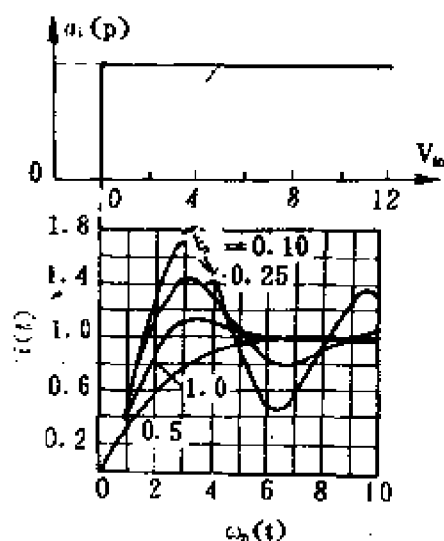


图 19.8 石英挠性加速度传感器的阶跃响应特性

## 19.7 压阻式加速度传感器

压阻式加速度传感器具有一般压电力敏传感器不具备的直流响应特性,且输出稳定和线性度好,因此,科技工作者对这种传感器的研究工作十分活跃。提高压阻式加速度传感器性能遇到的两个技术难题,一是压阻器对温度十分敏感,二是压阻器耐冲击性能差。近年来,由于半导体技术的发展,有过载保护和空气阻尼的微机械硅加速度传感器已能耐冲击,用半导体压力传感器的温度补偿电路已能实现对压阻器的温度补偿。

压阻式加速度传感器的体积小、成本低,适用于步行机器人和汽车的控制系统,如制动控制系统和悬挂系统。

### 19.7.1 结构原理

压阻式加速度传感器由压阻器和一块混合集成电路组成,电路带有低温漂的集成运算放大器和 EMI 滤波器,全部组件封装在一个塑料盒内。

压阻式加速度传感器的结构原理如图 19.9 所示,这种硅悬臂梁结构能将加速度产生的惯性力转变成应变力。设置压阻器的硅载体片,其厚度通过各向同性蚀刻减薄。载体片的一端设置金属质量块,这样可提高灵敏度。按硅晶向排列的四个压阻器构成一个电桥电路。在元件的金属盒内注入硅油,这样能提高传感器的动态特性。

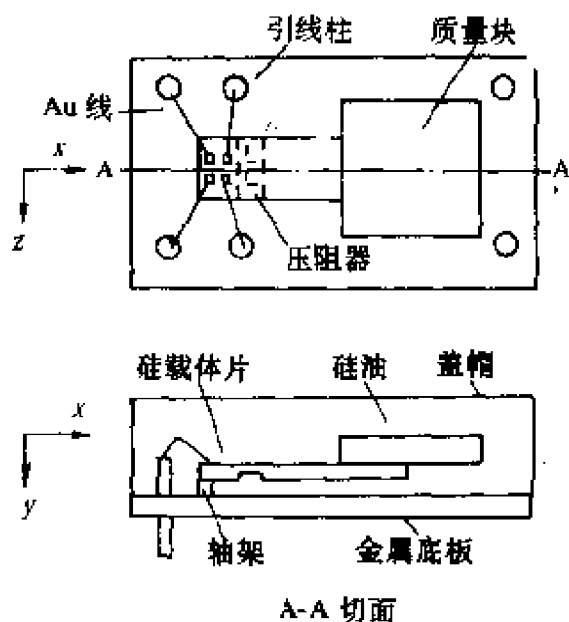


图 19.9 压阻式加速度传感器的结构原理示意图

### 19.7.2 静态特性分析

压阻式加速度传感器的敏感元件结构如图 19.10 所示。在  $Y$  方向  $1g$  的加速度,其灵敏度

$$S_y = \frac{3mC_x^* \pi_{44} V_s}{Wh^2} \quad (19.30)$$

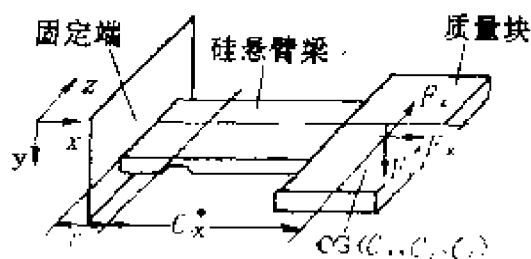


图 19.10 敏感元件结构示意图

式中  $\pi_{44}$  是压阻系数,  $m$  是质量,  $C_x^* = (C_x - r)$  是  $X$  方向质量重心(CG)到电阻位置的距离,  $W$  是梁的宽度,  $h$  是压阻器处的厚度,  $V_s$  是桥路供电电压。

$m$ 、 $C_x^*$ 、 $W$  和  $h$  都是设计传感器动态特性的参数,它们的

选择要考虑工作频率范围。

每个  $S_y$  的交叉轴灵敏度  $S_x$  和  $S_z$ ,

$$\frac{S_x}{S_y} = \frac{1}{C_x^*} \left( \frac{h}{6} + C_y \right) + f_1 \left( \frac{C_z}{C_x^*} \cdot \frac{2h}{W_x} \right) \quad (19.31)$$

$$\frac{S_z}{S_y} = f_2 \left( \frac{2h}{W_z} \right) \quad (19.32)$$

式中  $C_x, C_y, C_z$  是质量的 CG;  $C_x^*$  由  $C_x - r$  获得,  $r$  是由固定端到电阻器的距离;  $W_z$  是电阻器在  $Z$  方向宽度。  $f_1, f_2$  是惯性力  $F_x, F_z$  引起的力矩的输出, 它们还没有确切的表达式, 因为该力矩对压阻器上应力的作用不均匀, 这种作用与压阻器的  $Z$  位置有关。

由式(19.31)和(19.32)可看出, 若  $h/C_x^*$  和  $C_y/C_z^*$  小, 且对  $M_y$  有足够的刚度, 则可降低交叉灵敏度。

图 19.11 示出一个仿真直流输出, 灵敏度  $S_y$  是计算值, 交叉灵敏度  $S_x$  通过在重力加速度情况下, 沿  $Y$  轴方向绕  $Z$  轴旋转传感器得出。图中示出  $S_x = 0\%$  和  $S_x = 20\%$  情况下的直流输出非线性。

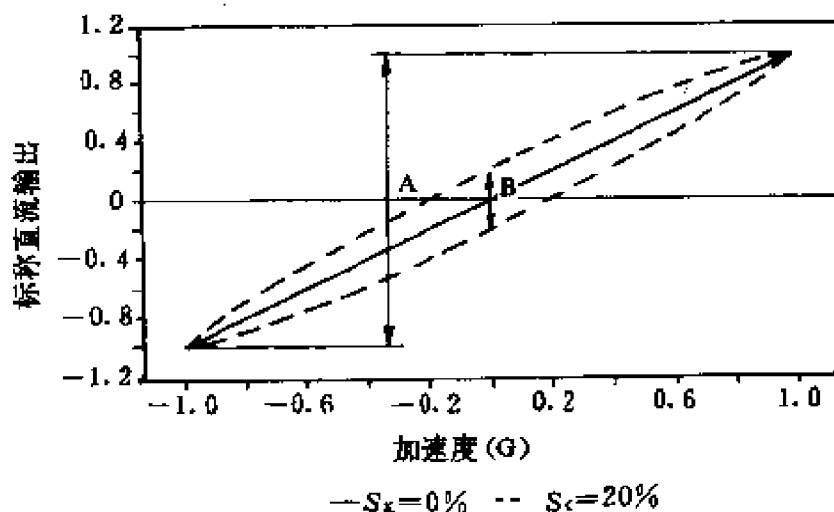


图 19.11 重力加速度情况下观测的直流输出非线性

在重力加速度情况下, 旋转期间, 由于交叉轴的加速度成分变化, 故交叉轴灵敏度的轨迹为非线性。交叉轴灵敏度可由下式计算:

$$\frac{S_x}{S_y} = \frac{B}{A} (\%), S_y = \frac{A}{2} (\text{mV/G}) \quad (19.33)$$



### 19.7.3 动态特性

固有频率  $f_n$  和阻尼比  $\zeta$  由式(19.34)给出,加速度传感器的动态特性由这两个参数决定,恰当地设置这两个参数能使传感器在工作频带内有平坦的灵敏度。

$$\zeta = \frac{\lambda}{2(mk)^{1/2}}, f_n = \left( \frac{k}{m} \right)^{1/2} / 2\pi \quad (19.34)$$

式中  $m$  是敏感质量,  $k$  是弹性系数,  $\lambda$  是阻尼系数。

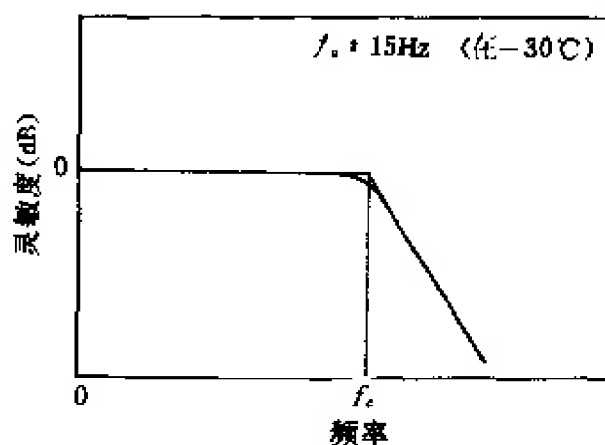


图 19.12 频率特性

$\lambda$  决定于质量块形状、硅油的粘性和压力,以及运动质量块和静止壁之间的间隔。阻尼比  $\zeta$  主要决定于硅油的粘性,为了提高抗振性,通常采用过阻尼( $\zeta \approx 8.7(-30^\circ\text{C})$ ,  $f_n \approx 260\text{Hz}$ )。

图 19.12 示出在  $-30^\circ\text{C}$  的灵敏度频率特性,截止频率

$$f_c = [\zeta - (\zeta^2 - 1)^{1/2}] f_n \quad (19.35)$$

在频率  $f_c$  处相位延迟  $\frac{\pi}{2}$ 。

为了克服灵敏度低和温度影响,传感器中设置了放大器和温度补偿电路。图 19.13 示出加速度传感器的电路。

放大器由四级低温漂运算放大器组成,它是单片集成电路,带有用于补偿零位偏置和灵敏度漂移的 P 型电阻器。混合集成电路由集成电路和厚膜电阻网络构成。

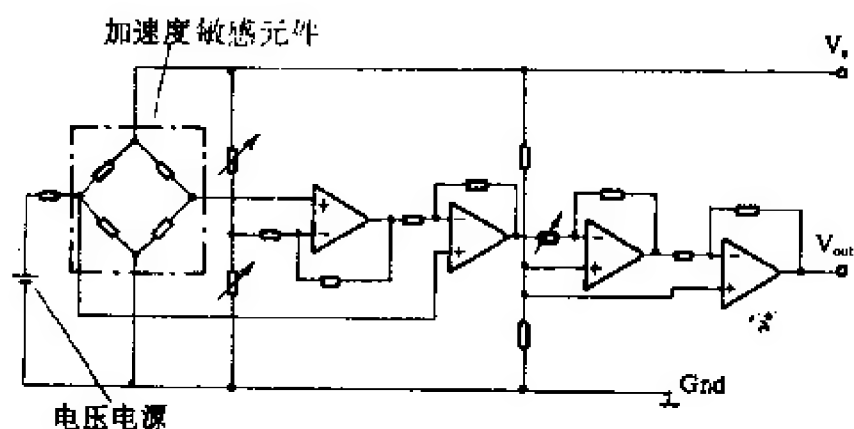


图 19.13 信号调制和补偿电路

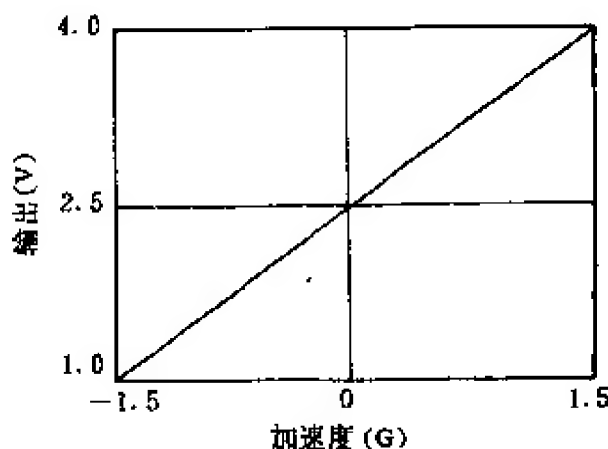


图 19.14 传感器的直流输出

传感器的差动输出经差动放大器放大,并转变成单极性输出,放大器起到温度补偿作用。静态输出如图 19.14 所示。

电路起补偿偏置电压漂移和灵敏度的作用。灵敏度补偿方法与压力传感器中使用的方法相同,它是由第三级运算放大器增益随温度反向变化来完成的。偏置漂移补偿是用一个并联的阻抗  $R_c$  作为敏感压阻应变计的一部分,其缺点是二阶误差既与压阻器的二阶系数有关,也与二次初始偏置漂移有关。图 19.15 示出偏置补偿电路。

这种电路由温度补偿电阻  $R_c$  和敏感温度的电源组成。输入电源通过电阻器  $R_c$  加到桥路的一个输出结点上。偏置电压

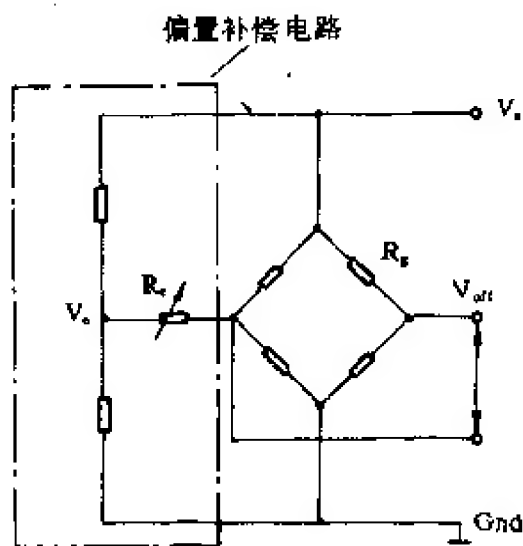


图 19.15 偏置补偿电路

$$V_{off}(T) = \frac{V_s}{4n} [(1 - 2K) + (\beta_1 - 2K(\beta_1 + \alpha))T + (\beta_2 - 2K(\beta_2 + \alpha\beta_1))T^2] \quad (19.36)$$

式中  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  是压阻应变计的一阶和二阶温度常数， $n$  是比率  $R/R_s$  ( $R_s$  是在参考温度的应变阻抗)， $K = V_0/V_s$  ( $V_0$  是参考温度的电压)， $\alpha$  是电压的一阶温度系数。

偏移电压有一阶和二阶两个温度常数。通过合理配置  $n$ 、 $K$ 、 $\alpha$  可消除温度影响。 $K=0$  意味着通常方法，这时  $V_{off}(T)$  仅决定于  $n$ 。因此，用这种方法不能灵活地补偿。

图 19.16 示出新旧补偿方法的比较(初始总偏置漂移达 100%)。用通常方法压阻器二次温度系数产生 23% 的误差。用新方法，误差减小到约 2%。

#### 19.7.4 性能

压阻式加速度传感器的典型性能如下：

动态范围	$\pm 1.5g$
工作温度	$-30 \sim 85^\circ\text{C}$
贮存温度	$-40 \sim 105^\circ\text{C}$

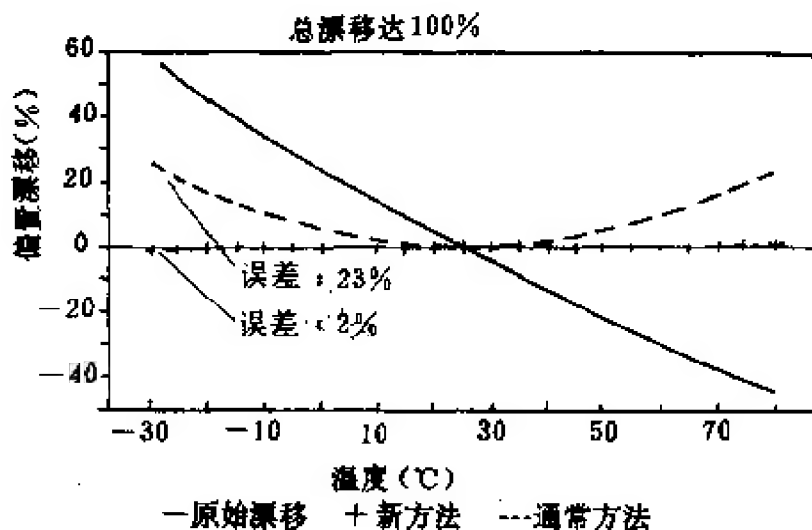


图 19.16 误差补偿

灵敏度	1mV/g
非线性输出	<1%(F)
交叉轴灵敏度	≤1.5%(F)
频率范围	DC~15Hz(-30℃)
灵敏度漂移	≤±1%(F)
偏置漂移	≤±3%(F)
电源电压 $V_s$	5V

## 19.8 压电式加速度传感器

利用压电效应可构成多种结构的数字式线性加速度传感器<sup>[15]</sup>,图 19.17 示出压电数字式线加速度传感器的原理图。如图所示,在敏感轴方向设置一个拉伸谐振器和一个压缩谐振器,拉伸谐振器的频率  $f_T$  和压缩谐振器的频率  $f_c$  相减,略去高次项的表达式如下

$$\begin{aligned}
 f_T - f_c &= f_0 + k_1 a - k_2 a^2 + k_3 a^3 - f_0 + k_1 a \\
 &\quad + k_2 a^2 + k_3 a^3 = 2k_1 a + 2k_3 a^3 \quad (19.37)
 \end{aligned}$$

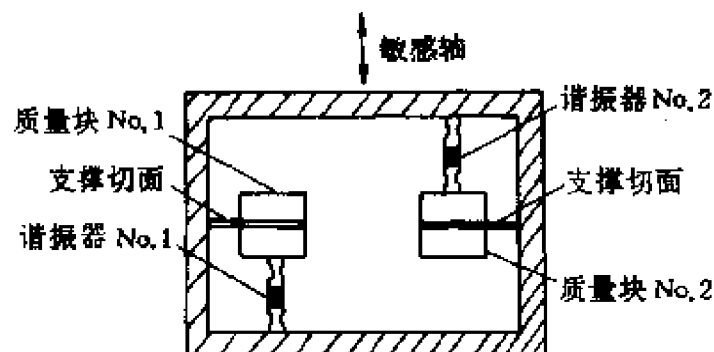


图 19.17 数字式线性加速度传感器的结构原理图

由上式可知，由于二次项被抵消，而三次项很小（20g 时小于 0.02%），故频率差系统输出一个正比于过载加速度的数字频率。

图中质量块由悬臂梁弹簧支承，悬臂梁弹簧垂直于晶体轴和敏感轴的平面。通过测定谐振器和外壳的不同热膨胀量，就能补偿在热稳定条件下谐振器的频率温度系数。

## 19.9 光测弹性效应激光加速度传感器

在透光轴相互垂直的两个偏振片中间插入透明的各向同性介质，当介质受到机械压缩或拉伸时，介质将产生双折射现象。这种现象称为光测弹性双折射效应。利用这种效应可构成线性加速度传感器，其工作原理如图 19.18 所示。图中虚线所标明的范围为激光谐振腔， $M_1$ 、 $M_2$  为构成谐振腔的两个反射镜， $P$  为增益介质， $B$  为具有光测弹性效应的双折射物质，激光束通过  $B$  时分解振动矢量互相垂直的正交线偏振光  $E$  和  $O$ ，经过反射镜的激光束仍为互相正交，它们之间的差频  $\Delta\omega$  与材料  $B$  沿  $y$  轴的加速度成正比。

激光加速度传感器的动态范围可达  $10^7g$ ，分辨率为  $10^{-6}g$ ，交叉耦合小于  $10^{-6}$ 。因为激光二极管可做得很小（管长小于 1mm），故激光加速度传感器可实现微型化。

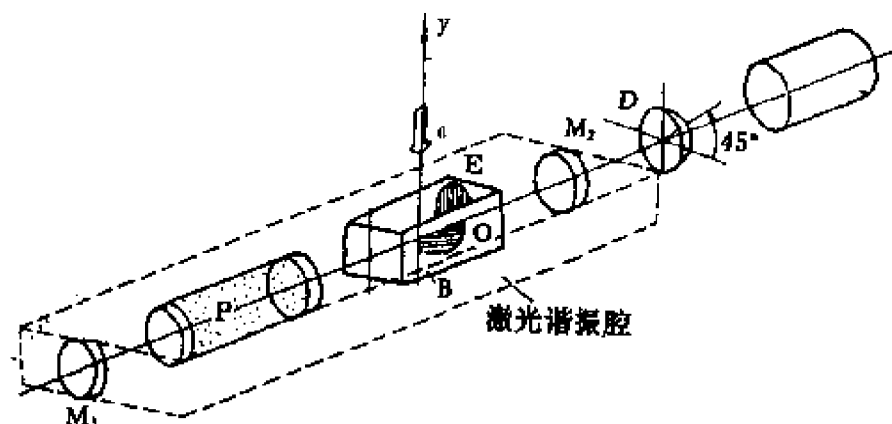


图 19.18 光测弹性效应激光加速度传感器工作原理示意图

## 19.10 光纤加速度传感器

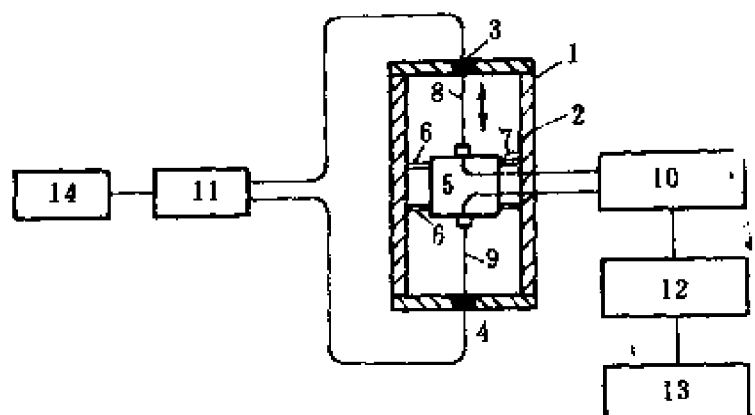
光纤加速度传感器正在研制的有马赫·曾德干涉仪型和迈克尔逊干涉仪型两种,它们的原理基本一致。

### 19.10.1 马赫·曾德干涉仪型光纤加速度传感器

马赫·曾德干涉仪型光纤加速度传感器的结构原理如图 19.19 所示。图中壳体 2 中的上下两光纤 8 和 9 在无张紧状态下穿过质量块 5,然后穿过壳体到耦合器 10。光纤 8 和 9 是马赫·曾德干涉仪两臂的一部分,这两个臂至分束器 11,并与激光器 14 相联,耦合器 10 通过单根光纤把调制光纤导到光电检测器 12 及信号处理器 13。耦合器接收到来自两根光纤的光为两束相干光束,这两束相干光束的相位差与加速度  $a$  成正比。

### 19.10.2 迈克尔逊干涉仪型光纤加速度传感器

迈克尔逊干涉仪型光纤加速度传感器的结构原理如图 19.20 所示。图中 1 为光纤加速度计本体,在壳体 2 上下两端盖上分别开窗孔 3、4,检测质量块 5 与金属模块元件 6、7 支承在壳体的边壁上,6、7 限制了检测质量块 5 的横向运动,可以沿箭头所示的方向



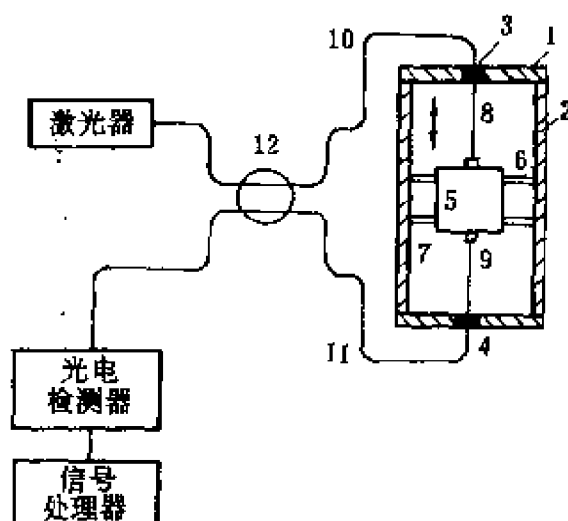
1—光纤加速度计本体；2—壳体；3,4—开窗孔；5—质量块；6,7—金属膜片元件；  
8,9—光纤；10—耦合器；11—分束器；12—光电检测器；  
13—信号处理器；14—激光器

图 19.19 马赫·曾德干涉仪型光纤传感器的结构原理图

运动，单模光纤 8、9 分别紧固在检测质量块 5 的上下两表面上。

光纤 8、9 是迈克尔逊干涉仪两臂 10 和 11 的一部分，壳体外部的光纤与分束器 12 相连，光纤 8 的外部光纤经分光束器与光电检测器相连，光电检测器的输出送给信号处理器。

上下两根光纤分别紧固在上下盖的两个孔内，两根光纤处于稍微绷紧状态，质量块 5 的运动在箭头方向上产生一个力的分量，从而使一根光纤的长度略微增加，另一根光纤的长度略微缩短。



1—光纤加速度计本体；2—壳体；  
3,4—开窗孔；5—质量块；  
6,7—金属膜块元件；  
8,9—单模光纤；10,11—干涉  
仪两臂；12—分束器

图 19.20 迈克尔逊干涉仪式光纤加速度传感器结构原理示意图

假设在壳体内支承检测质量的上下两根光纤长度为  $L$ , 它们有效地起着支承质量块的弹簧作用, 倘若壳体受到的是垂直向上的加速度, 则上光纤将伸长  $\Delta L$ , 下光纤将缩短  $\Delta L$ , 此时检测质量的惯性力

$$F = 2A\Delta f = ma \quad (19.38)$$

式中  $A$  是光纤的截面积;  $\Delta f$  是每根光纤的张力变化值。

若最小可检测的相对相位差为  $\Delta\Phi_{\min}$ , 则最小可检测的加速度

$$a_{\min} = \frac{E\lambda}{16n} \cdot \Delta\Phi_{\min} \cdot \frac{d^2}{Lm} \quad (19.39)$$

式中  $E$  是光纤的弹性模量;  $\lambda$  是在真空中的波长;  $n$  是光纤折射率;  $d$  是光纤直径;  $L$  是光纤长度;  $m$  是检测质量;  $\Delta\Phi_{\min}$  是最小可检测的相对相位差。

由式(19.39)可以看出, 光纤加速度计的最小可检测加速度随光纤直径的平方而增加, 而与光纤的长度成反比。

对于典型的光纤, 光纤折射率  $n$  为 1.5, 光纤直径  $d$  为  $80\mu\text{m}$ , 壳体内的光纤长度  $L$  为  $1\text{cm}$ , 光纤的弹性模量  $E$  为  $7.3 \times 10^{10}\text{Pa}$ 。若质量块  $m$  为  $1\text{g}$ , 最小可检测的加速度  $a_{\min}$  为  $0.3 \times 10^{-6}\text{g}$ 。

## 19.11 振弦式加速度传感器

振弦式加速度传感器的工作原理如图 19.21 所示。图中检测质量  $m$  由两根柔性弦固定。这种传感器能敏感出沿弦轴方向的加速度。敏感加速度时, 柔性弦产生张力差, 从而使两根支承弦的固有频率变化, 两根柔性弦的频差与加速度成比例。

振弦式加速度传感器没有可动部件, 且电路简单, 可用脉冲频率表示被测加速度。这种传感器非线性误差大、精度不高和性能随温度变化大等缺点, 故难于广泛使用。

美国已将振弦式加速度传感器用于宇宙导弹上, 其分辨率为  $1 \times 10^{-4}\text{g}$ 。美国麻省理工学院研制的振弦式加速度传感器, 其偏



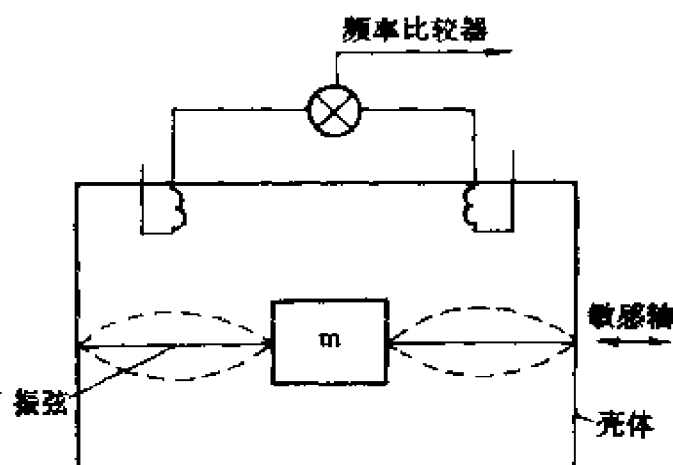


图 19.21 振弦式加速度传感器的工作原理图

值(逐日)达到  $10^{-6}g$ , 工作两年未断弦。

## 19.12 气流式线性加速度传感器

当今,线性加速度传感器种类繁多,但大部分加速度传感器都是以固态物质作为敏感质量体。固态线性加速度传感器虽然已广泛应用,但由于固态质量体在大冲击或高过载情况下会产生很大的惯性力,若不加以保护则会导致传感器失去正常的工作能力。我们发明的气流式线性加速度传感器是用气体敏感质量代替固体敏感质量<sup>[26-28]</sup>,因为气体质量很小,故避免了敏感质量引入过大的惯性力。

### 19.12.1 基本原理

密闭腔作加速运动时,其内的气体对密闭腔内表面施加一个与非引力加速度  $A$ (比力)方向相反的压力梯度

$$-\Delta P = \rho A \quad (19.40)$$

式中  $\rho$  是气体密度;  $A = a - g$ ,  $a$  是密闭腔的加速度,  $g$  是重力加速度。显然,检测出压力梯度  $\Delta P$  即可知道非引力加速度的大小和方向。但是,在一个小型密闭腔内,非引力加速度  $A$  能形成的  $\Delta P$  十

分小,难于检测出来。这里要介绍的不是直接检测压力梯度  $\Delta P$ ,而是通过检测压力梯度  $\Delta P$  引起热敏丝的阻值变化来得到非引力加速度。

在密闭腔内设置一对热敏丝  $r_1$  和  $r_2$ ,并使它们通电加热。这样,  $r_1$  和  $r_2$  均在密闭腔内形成自然对流的气流束。在重力场中,  $r_1$  和  $r_2$  构成电桥,静止时,  $r_1 = r_2$ ,电桥平衡,电桥输出为零。当密闭腔作加速运动时,气流束对密闭腔表面施加一个与非引力加速度  $A$ (比力)方向相反的压力梯度  $\Delta P$ 。在压力梯度  $\Delta P$  作用下气体产生流动,从而使  $r_1$  和  $r_2$  周围的温度发生不等量变化,使  $r_1 \neq r_2$ ,电桥输出与非引力加速度  $A$  成比例的模拟电压  $V$ ,即

$$V \propto A \quad (19.41)$$

加速度的方向由电桥输出模拟电压  $V$  的极性决定。

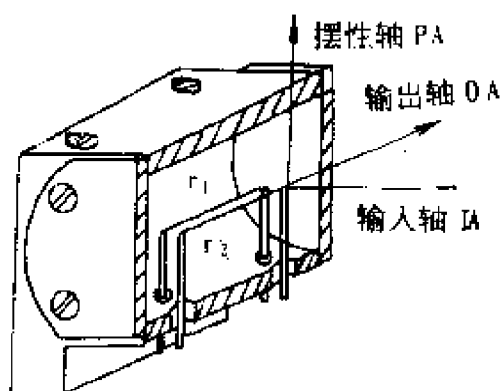


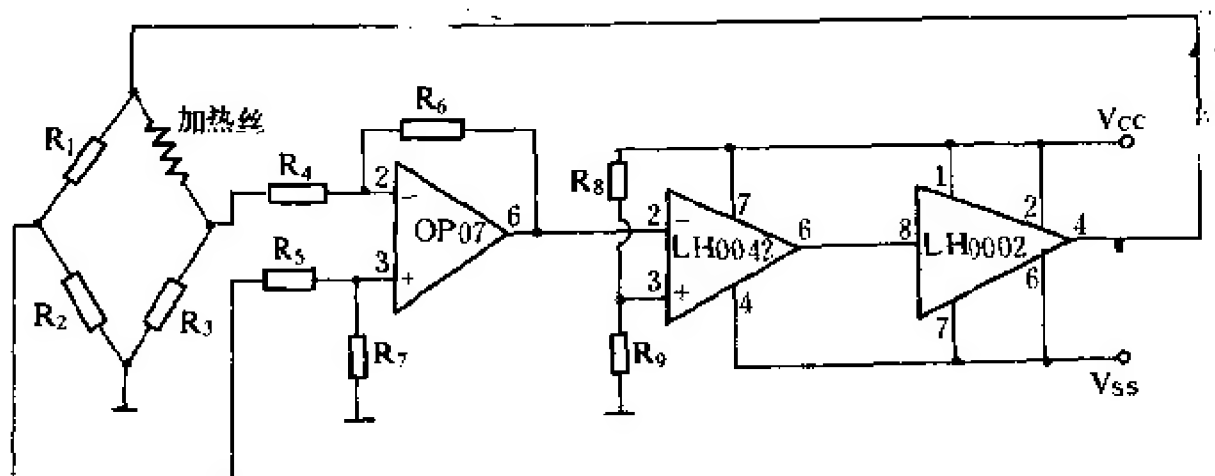
图 19.22 气流式线性加速度传感器的结构示意图

## 19.12.2 结 构

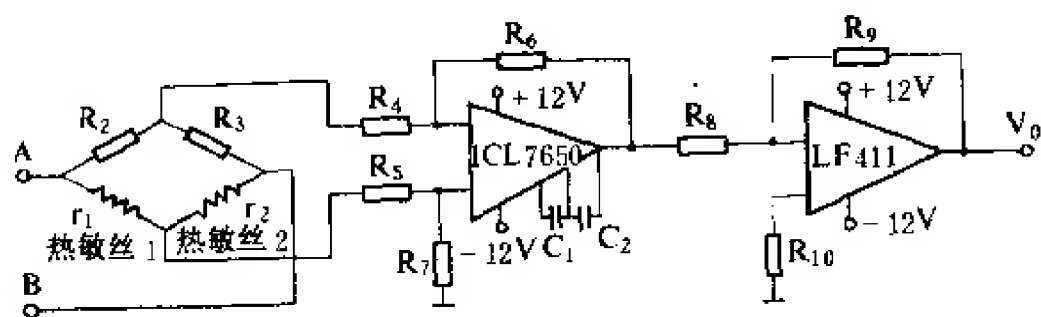
气流式线性加速度传感器的典型结构如图 19.22 所示。图中输入轴垂直于两根平行热敏丝  $r_1$  和  $r_2$ ,输出轴平行于热敏丝  $r_1$  和  $r_2$ 。热敏丝  $r_1$  和  $r_2$  既是敏感元件,又是加热元件。

## 19.12.3 电 路

上述气流式线性加速度传感器通过热敏丝检测加速度,故必须使热敏丝温度恒定。另外,若不进行传感器输出信号的线性处理,通常动态范围仅  $\pm 0.5g$ 。图 19.23 示出气流式线性加速度传感器的热敏丝恒温电路,以及使输出信号线性化的检测电路。该电路能使动态范围扩展到  $\pm 4g$ 。



(a) 恒温电路



(b) 信号检测电路

图 19.23 气流式线性加速度传感器的电路

#### 19.12.4 性能

图 19.24 示出图 19.22 所示结构的气流式线性加速度传感器的输出特性。加速度较小时，上游热敏丝  $r_1$  给下游热敏丝  $r_2$  加热，传感器输出的模拟电压与输入加速度成比例增加。当加速度增加到一定程度时，上游热敏丝  $r_1$  不再给下游热敏丝  $r_2$  提供热量，从而达到加速度的饱和输出状态。若加速度增加到超过饱和输出的加速度，这时  $r_2$  周围的流速大于  $r_1$  周围的流速，从而使  $r_2$  流失的热量大于从  $r_1$  获得的热量，故  $r_2$  的温度相对降低，导致热敏丝  $r_1$

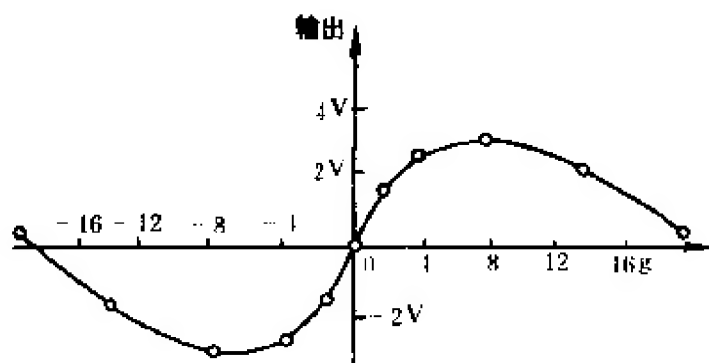


图 19.24 气流式线性加速度传感器的输出特性

和  $r_2$  的温度发生高低逆转,引起传感器输出信号与输入加速度成比例减小。上述现象可归结为流场的可变性,它就是图 19.24 中输出特性呈正弦形的原因。

图 19.24 所示气流式线性加速度传感器,其线性度好的动态范围仅为  $\pm 0.5g$ 。但是,采用图 19.23 的电路,通过恒温电路控制热敏丝温度,并由电路使输出电压线性化,这样即可拓宽动态范围。图 19.25 示出经线性化电路处理后气流式线性加速度传感器的输出特性。结果表明,改进电路后的加速度传感器动态范围拓宽到  $\pm 2g$ ,线性度  $< 2\%$ 。显然,进一步改进机械结构和信号处理电路,动态范围还可拓宽。

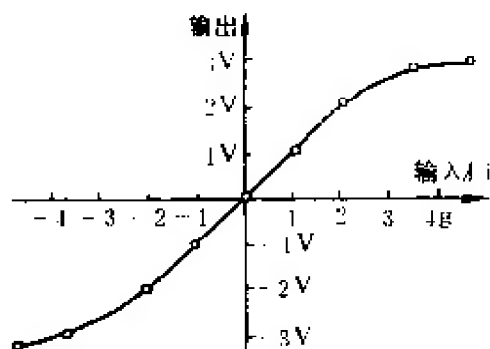


图 19.25 经线性化处理后加速度传感器的输出特性

## 第二十章 力和转矩传感器

触觉传感器的功能是提供有关机器人抓爪施加给物体的力的信息。本章叙述机器人调节或监控施加给部件的力和转矩,即叙述完成这一功能的力和转矩传感器。

### 20.1 通过监控电动机电流感知力

机器人抓爪试验举起部件的程序需要用于监控机械手关节的电动机电流,电流值达到某预定阈值以上,说明物体已被抓握。显然,电动机电流可用于量度抓爪的力。若抓爪被伺服控制,致动器是伺服电动机,则电枢电流  $I_a$  跟电动机产生的转矩  $T$  成比例,即

$$I_a = \frac{T}{K_T} \quad (20.1)$$

式中  $K_T$  是电动机转矩常数。通过机械旋转线性运动变换器(例如,齿条和齿轮)的作用,将转矩变换成力。半径为  $R$  的小齿轮传递的力

$$F = \frac{T_g}{R} \quad (20.2)$$

式中  $\eta$  是齿条和齿轮的效率(通常为 90%)。将式(20.1)代入式(20.2),可得电动机电流和它所产生的力之间的关系如下:

$$F = \frac{K_T I_a \eta}{R} \quad (20.3)$$

由式(20.3)可知,机器人被指令抓握部件时,电动机电流增加到一定值,该值足以产生阻止滑动的力,而力又小到不至于压坏部件的程度(或导致永久性损伤的重大机械形变)。对于操作的每个部件,应预先确定  $I_a$  的最大和最小值,并将信息储存在机器人控制器

里。应注意的是,由于摩擦和重力负载的影响,抓爪施加给物体的实际力小于式(20.3)给出的力。也就是说,电动机转矩(电流)需要克服用于伺服控制抓爪里的各种机械连接产生的摩擦,应校准控制器的这种损失。

这种力控制技术的问题是,式(20.3)中  $K_T$  随温度升高而减小,  $R$  随温度升高而增加,故抓爪力  $F$  随温度升高而减小。因此,为了用电动机电流控制施加给抓爪内部物体的力,需要监控温度和校准机器人控制器。另外,电刷噪声和电刷电阻影响精确监控电枢电流,虽然抓爪内使用无刷直流电动机能大幅度减小这种影响,但电动机和整流电路使抓爪的价格昂贵。

上述施加给物体的力是通过电流推断出来,而不是测量出结果。因此,这种技术实际上不是敏感技术,它不能敏感抓爪自身内部的部件重量和机械参量的变化,从而导致被抓物体掉落或受损。利用差动变压器 LVDT 能精确测量作用于物体的实际力  $F$  与距离平衡点的位移  $x$  之间的关系:

$$F = Kx \quad (20.4)$$

式中  $K$  是弹性常数。显然,弹簧长度变化  $x$  是力  $F$  的量变,即

$$x = \frac{F}{K} \quad (20.5)$$

式中  $K$  是常数,  $x$  由 LVDT 检测。因此,通过 LVDT 可输出跟力  $F$  成比例的电压,这种检测方法能获得  $0.001 \sim 1.0 \text{ kgf}$  的力。但 LVDT 有零位漂移、成本高和  $K$  值随温度而变化等缺点,特别是它仅能单方向测力,这些都限制了它在机器人中的应用。

## 20.2 应变计力敏传感器

应变计的基本工作原理是机械形变使应变片的电阻发生变化,电阻变化量跟施加力的大小成比例。图 20.1 示出由塑料或其他弹性体构成的简单应变计结构原理示意图。如图 20.1(a)所示,

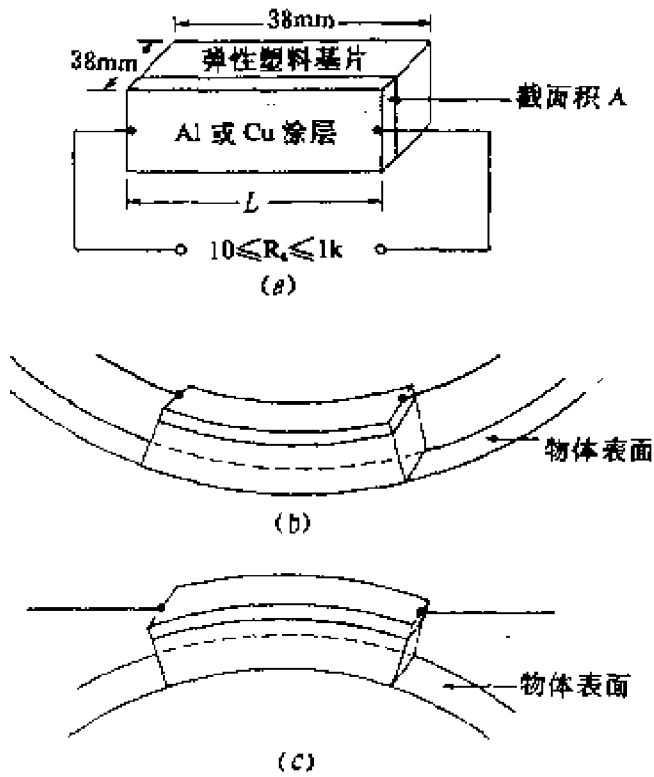
塑料体顶表面涂覆一层薄的导电材料(例如铝或铜)。若导电涂层有均匀的截面积  $A$ , 则应变片的电阻

$$R_g = \frac{L}{\sigma A} \quad (20.6)$$

式中  $\sigma$  是导电材料的电导率,  $L$  是应变片的长度。将图 20.1(a) 所示应变片粘到物体上, 则物体的形变使其产生弯曲, 形成图 20.1(b) 所示凹面向上的弯曲, 或图 20.1(c) 所示凹面向下的弯曲。这种弯曲使导电材料  $A$  的变化不大, 但应变片的长度可能减小(图 20.1(b)), 也可能延长(图 20.1(c))。应变片的尺寸变化引起的电阻减小或增加可由式(20.6)给出。

应变计有四种类型: 无粘合丝型、粘合金属箔型、薄膜型、半导体型。第

一种类型不用非导电载体, 敏感元件通常仅由极细的铂钨丝构成。第二种类型是将薄铜箔或锡合金箔粘到非导电基体上, 或直接粘到待研究的物体上。第三种类型是通过真空或溅射技术将电阻器沉积在热处理过的钢载体上。第四种类型的应变计灵敏度最高, 可分为两种, 一是将硅元件粘在悬臂梁(或膜片)上的“粘接棒半导体应变计”; 二是利用集成电路的光刻和扩散技术制作的“扩散型半导体应变计”。



(a) 未形变应变片 ( $L=38mm$ );  
(b) 应变片凹面向上 ( $L<38mm$ ,  $R_g$  减小);  
(c) 应变片凹面向下 ( $L>38mm$ ,  $R_g$  增加)。

图 20.1 应变计结构原理示意图

不管采用哪种类型的应变计,都必须用电子电路检测应变片的电阻变化,从而输出电压。这种电路如图 20.2 所示,应变片是惠斯登电桥的一个臂( $R_g$ ),将另一个臂的电阻  $R_1$  调节到接近未形变的应变片电阻。电桥还包括  $100\text{k}\Omega$  的固定电阻器  $R_2$  和  $1\text{M}\Omega$  的平衡电位计  $R_b$ 。若电桥开始时达到平衡,则

$$R_g R_b = R_1 R_2 \quad (20.7)$$

输出电压  $V_{AB}$  为零。应变片形变引起  $R_g$  的变化导致电桥失衡,从而使  $V_{AB}$  为非零值。装有应变计的物体施加已知力时,即可根据力与  $V_{AB}$  的比例关系校准系统。

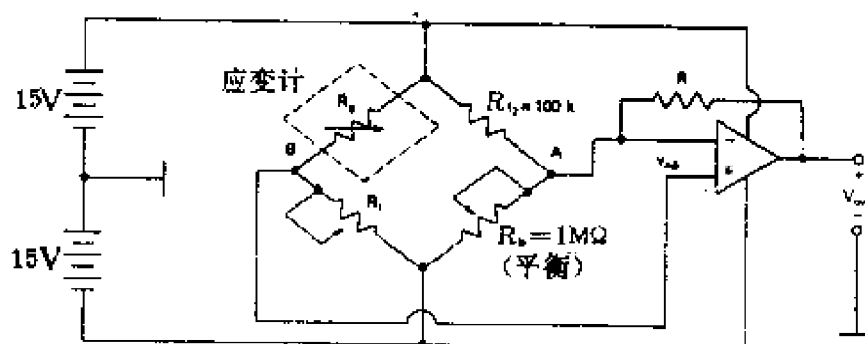


图 20.2 应变计电桥电路

应变计的最大问题是应变片的电阻随环境温度变化,从而出现物体未受力即发生电桥失衡现象。克服这种缺陷的办法有两个,一是定期使电桥重平衡,二是利用两块应变片和两个电桥,以它们输出的差作为实际检测信号。后一种方法需要更多的电路,但这样能使温度漂移为二阶效应。

应变计可用作机器人的力敏元件。如图 20.3 所示,应变计设置在平行抓爪的指背后,指抓握物体时,应变计监控产生的偏转。若已知抓爪材料和结构的力特性与偏转的关系,则可得到抓爪力与输出电压的关系。用这种方法抓握物体,被抓物体应用固体材料制作,形变应小于抓爪手指的形变。显然,用这种方法抓举鸡蛋等脆性物体或聚苯乙烯泡沫制品时,难于控制输出力。因此,还需要开发其他力敏传感器。



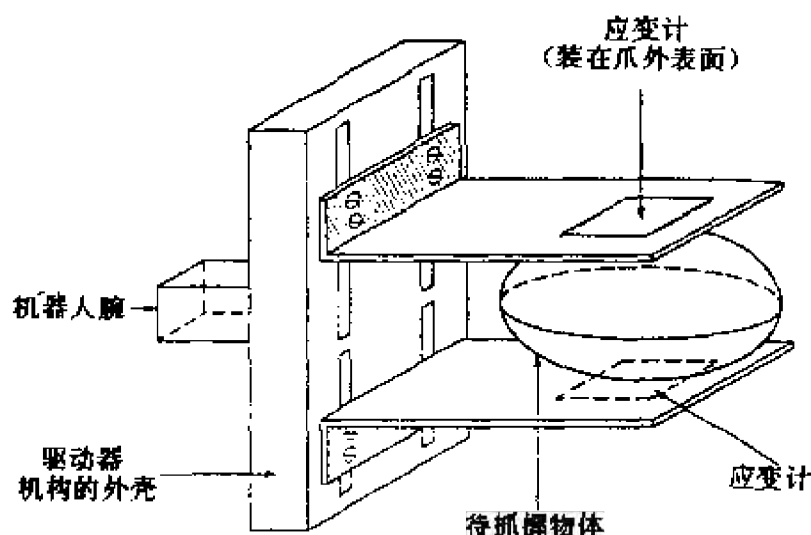


图 20.3 由应变计构成的机器人力敏传感器

70 年代中期美国斯坦福大学利用应变计研制了一种机器人用六维力和转矩传感器。如图 20.4 所示,它是利用一段铝管巧妙加工成串联的弹性梁,在梁上粘贴一对箔应变片(一片用于温度补偿)。这种装置长 81mm,外径 76mm,壁厚 4.6mm。

由图可知,有八个具有四个取向的窄梁,其中四个的长轴在  $z$  方向(用  $P_{x+}$ ,  $P_{y+}$ ,  $P_{x-}$  和  $P_{y-}$  表示),其余四个的轴垂直于  $z$  方向(用  $Q_{x+}$ ,  $Q_{y+}$ ,  $Q_{x-}$  和  $Q_{y-}$  表示)。一对应变片由  $R_1$  和  $R_2$  表示并取向,使得由后者中心通过前者中心的矢量沿正  $x$ ,  $y$  或  $z$  方向,例如,在梁  $P_{x+}$  和  $P_{y-}$  上的应变片垂直于  $y$  方向。梁一端的颈部在应变片处有放大应变的作用,而弯曲转矩可忽略。

若一对应变片的输出电压用梁的名字表示,例如,位于梁  $P_{x+}$  上的  $R_1$  和  $R_2$  产生的电压用  $P_{x+}$  表示,则力  $F_x$ ,  $F_y$  和  $F_z$ , 以及转矩  $M_x$ ,  $M_y$  和  $M_z$  有如下比例关系

$$F_x \sim P_{y+} + P_{y-}$$

$$F_y \sim P_{x+} + P_{x-}$$

$$F_z \sim Q_{x+} + Q_{x-} + Q_{y+} + Q_{y-}$$

$$M_x \sim Q_{y+} - Q_{y-}$$

$$M_y \sim Q_{x-} - Q_{x+}$$

$$M_z \sim P_{x+} - P_{x-} + P_{y+} - P_{y-} \quad (20.8)$$

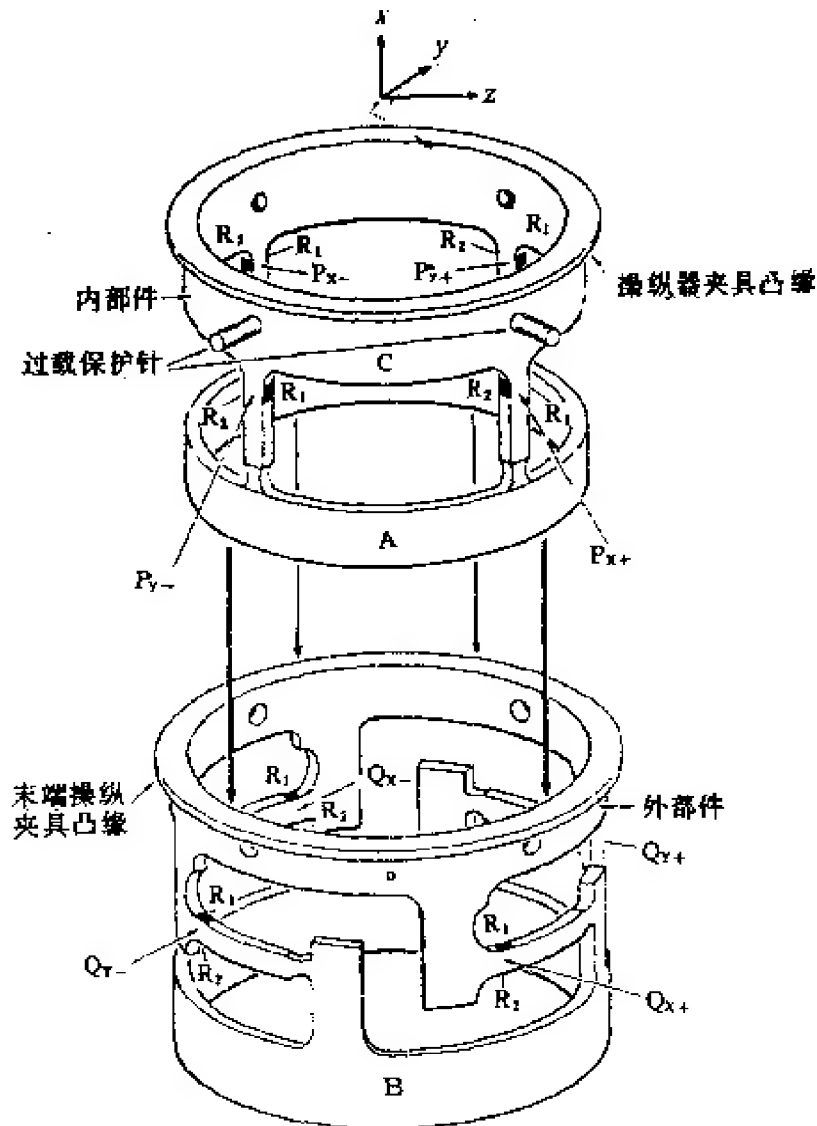
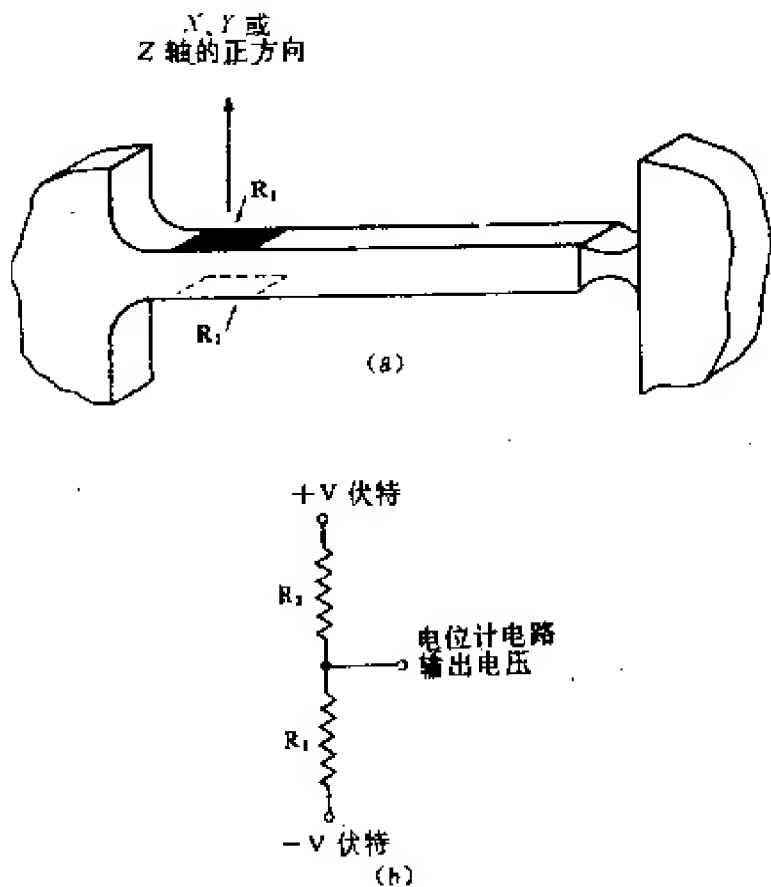


图 20.4 机器人用六维力和  
转矩传感器

不是每个应变片单独使用电桥,而是用图 20.5 所示的电位计。虽然这种方法不如惠斯登电桥那样灵敏,但分压器电路用很少的元件即可得到所要求的温度补偿作用。因为铝是良好的热导体,故环境温度变化导致两个应变片的电阻变化量几乎相同,从而使电路输出不变。

为了防止由于过载造成失效,装置应设置切变针。切变针允许

腕在  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  方向最大安全力分别为 32、32 和 49kg，最大安全转矩负载分别为 83、83 和 166cm · kg。



(a)设置应变片的机构;(b)电位计电路。

图 20.5 单自由度力转矩传感器

图 20.6 示出用十字轮代替圆筒的传感器，设置在十字轮偏转棒四侧的半导体应变片在箔形的位置能提高灵敏度。采用电位计电路，可得到图 20.6 所示的  $W_1$ ~ $W_8$  的八个输出。然后使用  $6 \times 8$  变换矩阵将这些数据变换成图中示出的力和转矩的实际  $x$ 、 $y$  和  $z$  成分。由这种传感器获得的信息可调节施加给几种试验物体的抓爪力。

利用应变片的机器人力敏感传感器，应变片设置在抓爪的指上。这样可得到  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的力信息，以及通过力信息和抓爪开度获得三个转矩。这种传感器的性能，灵敏度为 0.5V/0.454kg，线

性范围±9kg,过载 18kg,重 57g。

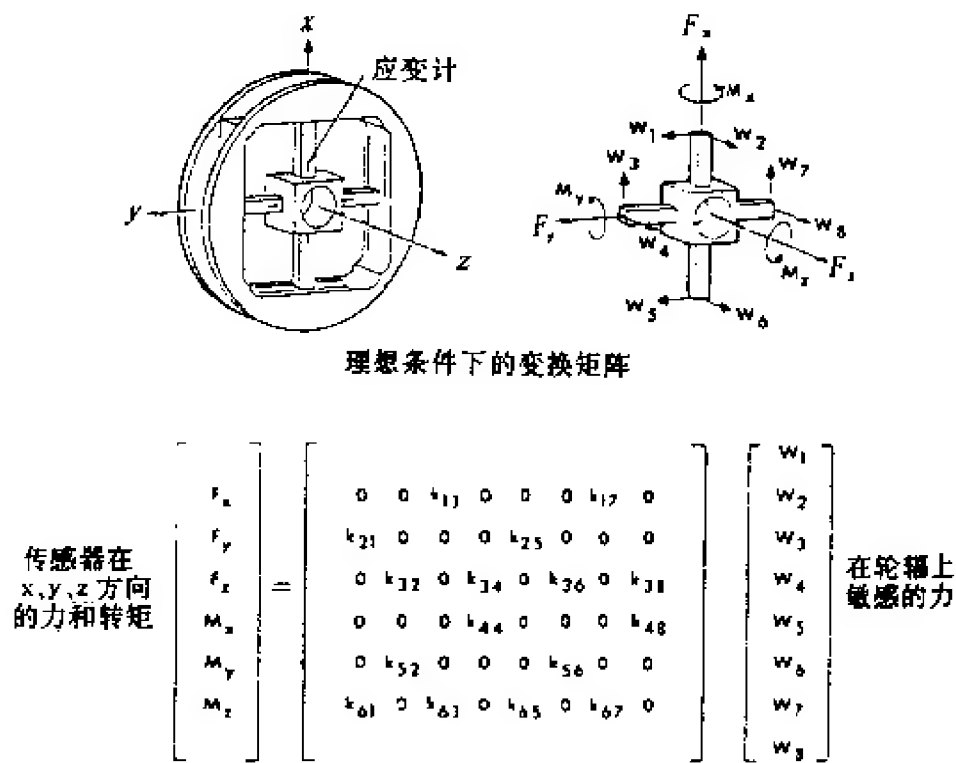


图 20.6 十字轮型传感器

### 20.3 电位计式力敏传感器

电位计式力敏传感器的结构原理如图20.7所示。待测力加到

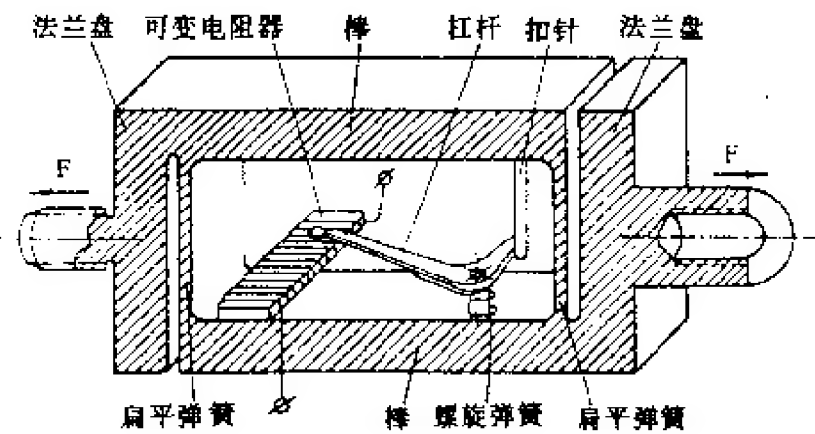


图 20.7 电位计式力敏传感器结构原理示意图

与螺纹耦合的法兰盘上,并通过扁平弹簧连接的棒传送,棒的位移跟外加力成比例。扣针挤压杠杆,杠杆的滑动接点沿可变电阻器移动。螺旋弹簧使杠杆复位。这种传感器的精度约 $\pm 3\%$ ,可用于检测约 3kN 缓慢变化的力。

## 20.4 膜片式压力传感器

膜片式压力传感器的结构原理如图20.8所示,压力作用于膜

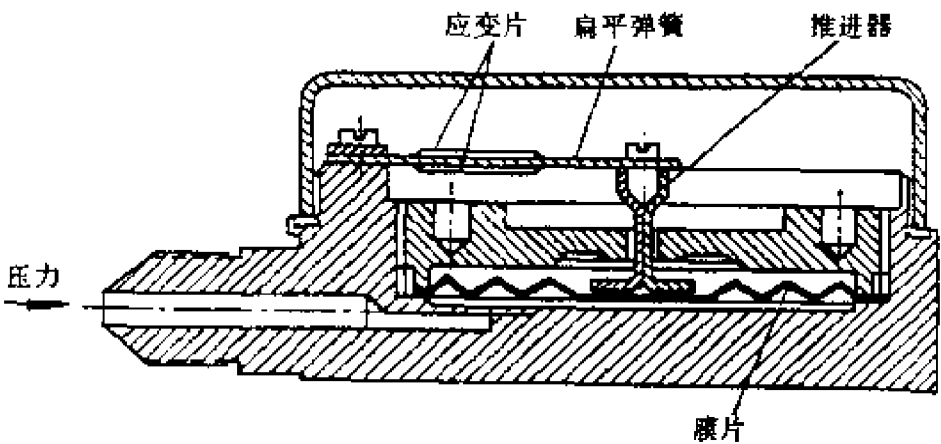


图 20.8 膜片式压力传感器

片上,膜片通过推进器给扁平弹簧加压力,扁平弹簧上粘贴应变片。这种传感器精度约 $\pm 1.5\%$ ,动态范围 0.1~0.6MV/m<sup>2</sup>。若弹性敏感元件用膜盒或布尔顿管,则微小压力变化能引起相当大的位移,这种传感器的输出信息不需放大即可使用。

## 20.5 电感式压力传感器

电感式压力传感器的结构原理如图 20.9 所示。这种传感器由磁路、线

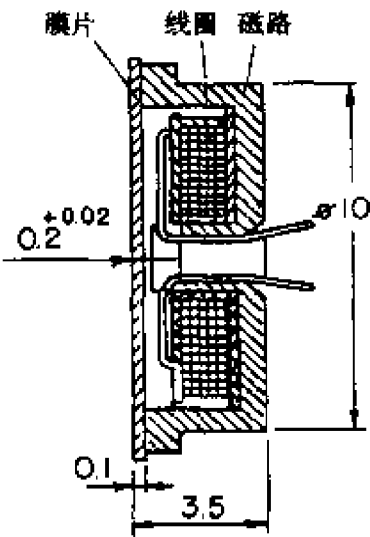
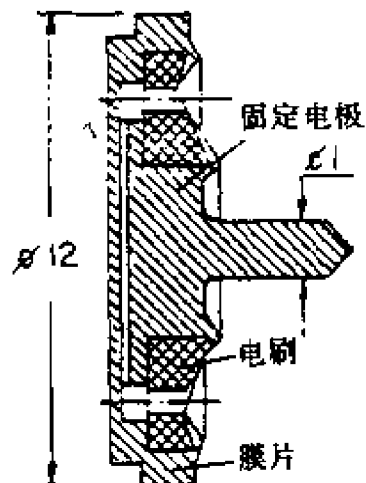


图 20.9 电感式压力传感器

圈和铁磁材料制作的膜片构成。膜片用于敏感压力,其与线圈之间的初始间隙约 0.2~0.5mm。这种传感器广泛用于检测低压力( $<0.1\text{MV}/\text{m}^2$ )和快速变化的压力。



## 20.6 电容式压力传感器

电容式压力传感器的结构原理如图 20.10 电容式压力传感器图 20.10 所示。这种传感器由跟外壳构成一体的膜片,以及通过电刷跟外壳绝缘的固定电极组成,膜片和电极间的空隙尽可能小。该传感器的精度约 2%。

## 20.7 力平衡式压力传感器

为了提高压力传感器精度,必须使用不同于上述的方法设计传感器。图 20.8~20.10 所示传感器,力作用于弹性元件,并经特种弹簧式膜片自身系统的弹性予以平衡。这种方法测量力、压力或加速度越高,测量值的精度越低,而测量小力的有效方法是建立在测量力跟人为力平衡的基础上。图20.11示出的平衡式压力传感

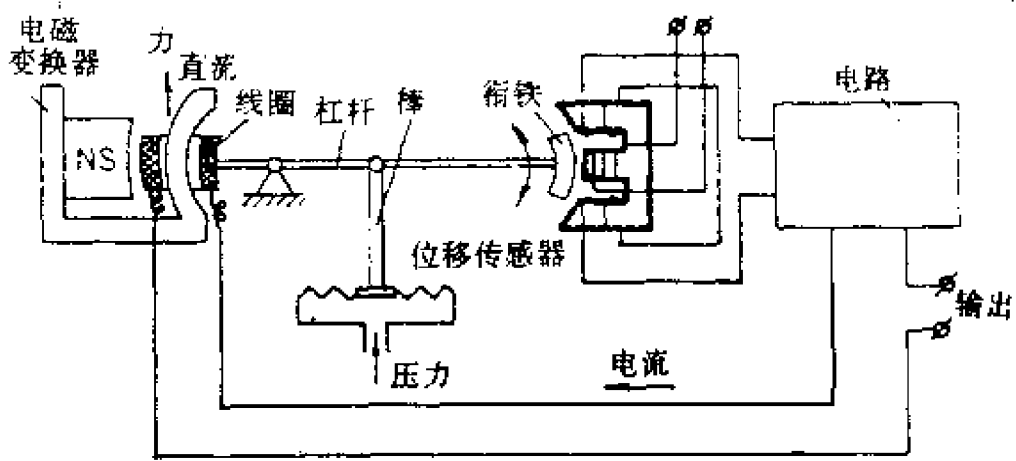


图 20.11 力平衡式压力传感器的结构原理示意图

器与上述传感器不同。这种传感器测量力通过棒驱动杠杆,衔铁跟电感式位移传感器一道工作,传感器信号经电路变换后传送给电磁变换器的线圈。杠杆和衔铁偏转越大,变压器产生的力越高。这种力使杠杆返回初始位置,电流用于补偿压力和作为器件的输出。

## 20.8 电感式转矩传感器

电感式转矩传感器由磁敏传感器和插入装置构成,其结构原理如图20.12所示。图中插入装置设置在传动装置和负载体之间,

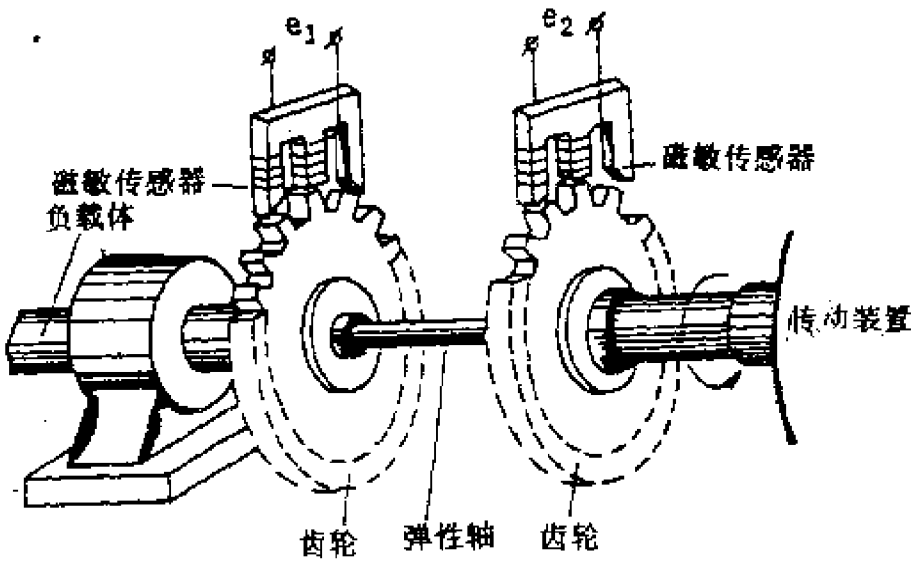


图 20.12 转矩传感器的结构原理示意图

而插入装置由弹性轴和两个齿轮组成。磁敏传感器的放大图如图 20.13 所示,一个磁极位于一个齿的对面时,另一个磁极则位于两个齿之间。因此,轴旋转过程中磁通量交替地通过磁线圈,在线圈中产生的电动势变化频率跟转速成比例。轴未加转矩时,齿同步通过磁体。但是,轴加

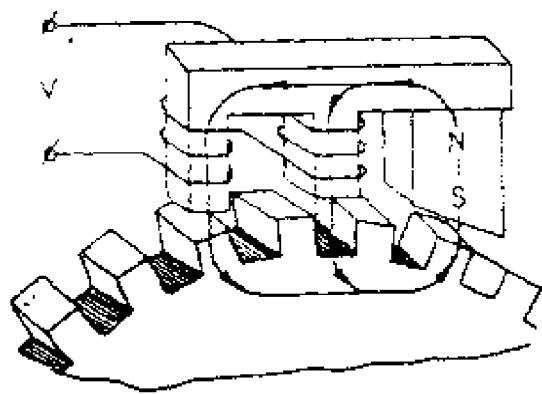


图 20.13 转矩传感器中的磁通量

负载时,两轮间产生旋转移动,因此,电动势之间产生跟转矩成比例的相移,该相移跟转速无关。这种传感器的精度决定于弹性轴的材料性能,恒温时的稳定性约为 0.1~0.2%。

## 20.9 腕力传感器

腕力传感器安装在机器人臂端与末端执行器之间,由一些应变片组成,这些应变片可以测量由外力引起的机械结构的形变。

### 20.9.1 腕力传感器的基本原理

腕力传感器通常比较小巧、灵敏,重量较轻(大约 340g),结构紧凑——直径约 10cm,厚度约 3cm,动态范围可达 90kg。为了减小滞后和提高测量精度,传感器由一整块金属(通常为铝)制成。图 20.14 是这种传感器的原理图,四个变形杆上安装了八对半导体应变片,也就是在变形杆的每面各有一个应变片。将变形杆相对端面上的应变片以差动方式与电位计电路连接,电位计的输出电压正比于与应变片平面相垂直方向的分力。应变片的差动连接可以对温度变化进行自动补偿。不过这仅是一种简单的一阶补偿。由于八对应变片分别垂直于力坐标系的  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴,因此,将输出电压适当相加和相减,可求得力  $F$  的三个分量以及力矩  $M$  的三个分量。这一过程可以用把传感器输出左乘以传感器标定矩阵来完成(在下面讨论)。

大多数腕力传感器实际上是一种变换器,它将作用在手上的力和力矩转换为可测量的腕部的挠曲和位移。力传感器所引起的腕部运动不会影响机械手的定位精度。机器人对这种传感器的性能要求如下:

(1) 刚性高。机械部件的固有频率与其刚性有关,高刚性使扰动力很快衰减,故可在短时间内得到精确的输出,并减小由于外力或力矩施加位置有误而引起的偏差。



(2) 结构紧凑。这样可确保机械手在拥挤的工作空间运动不受限制,也可使传感器和工作空间内其他物体碰撞的可能性降到最低。结构紧凑的力传感器,能使传感器尽可能接近工具,从而减小手小角度旋转时的定位误差。通常希望测量尽可能大的力和力矩,而传感器和手之间距离的减小有利于减小手部作用力的力臂。

(3) 线性。力传感器对力和力矩的线性响应良好,故利用简单的矩阵运算可实现力和力矩的求解,并简化力传感器的标定过程(这一问题在下面讨论)。

(4) 减小滞后和内摩擦。内摩擦会降低力传感器的灵敏度。这是因为外力在形成可测量的形变之前,必须消耗一部分用于克服内摩擦。内摩擦还会引起滞后效应,使位置测量器件无法恢复到原来的输出值。

图 20.14 所示腕力传感器,考虑了上述要求。

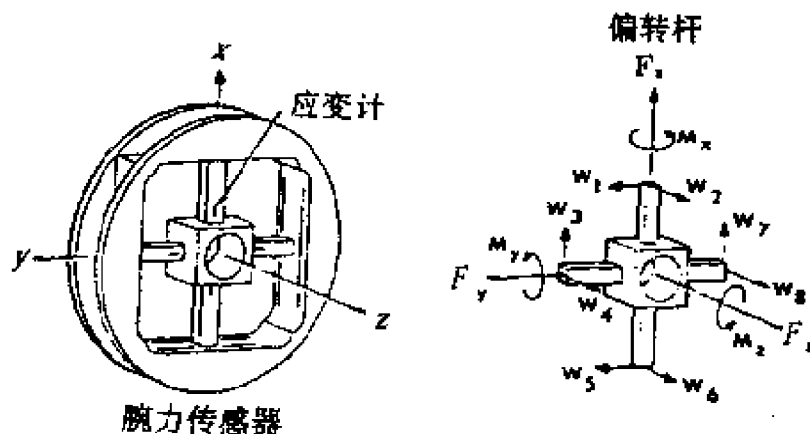


图 20.14 腕力传感器的结构原理图

## 20.9.2 力和力矩的还原

若应变片间的耦合效应可忽略不计,腕力传感器工作在材料的弹性范围内,并且应变片的输出与它们所受到的拉伸变形呈线性关系,则可利用简单的力-力矩平衡方法,将图 20.14 所示传感器得到的八个原始读数还原成对应于力传感器坐标系的三个正交力和力矩分量。利用力还原矩阵  $R_F$  (或称传感器标定矩阵)  $6 \times 8$  矩阵右乘以力的测量值,可以实现这种变换,从而求得所需的三个

正交力和力矩分量。由图 20.14 可知,沿力传感器坐标还原后的力矢量可利用如下公式求得

$$F = R_F W \quad (20.9)$$

式中

$$F \equiv (\text{力}, \text{力矩})^T = (F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z)^T$$

$$W \equiv \text{原始读数} = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_8)^T$$

并且

$$R_F = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & r_{18} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{61} & \cdot & \cdot & \cdot & r_{68} \end{bmatrix} \quad (20.10)$$

式 20.10 中,  $r_{ij} \neq 0$  是将原始输出  $W$  (单位为  $V$ ) 转换成力/力矩 (单位为  $N \cdot m$ ) 所需的系数。如果忽略应变片间的耦合作用,并假定力和力矩计算均相对于位于传感器中心的传感器坐标系原点进行,则由图 20.14 可得到  $r_{ij}$  为零的式(20.10)。参考图 20.14,式(20.10)中的力还原矩阵为

$$R_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{13} & 0 & 0 & 0 & r_{17} & 0 \\ r_{21} & 0 & 0 & 0 & r_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{32} & 0 & r_{34} & 0 & r_{36} & 0 & r_{38} \\ 0 & 0 & 0 & r_{44} & 0 & 0 & 0 & r_{48} \\ 0 & r_{52} & 0 & 0 & 0 & r_{55} & 0 & 0 \\ r_{61} & 0 & r_{63} & 0 & r_{65} & 0 & r_{67} & 0 \end{bmatrix} \quad (20.11)$$

通常,上述假定并不成立,总有某种耦合作用存在。从而使某些力传感器可能使求解力的计算产生 5% 的误差。因此,实际上常常用一包含 48 个非零元素的矩阵取代该力还原矩阵。下面讨论用此“满”矩阵标定力传感器。还原的力矢量  $F$  可用作控制机械手动作的误差信号。使用腕力传感器的缺点在于它只能提供点接触装配界面处的还原力矢量。

### 20.9.3 传感器标定

标定腕力传感器的目的在于利用实验数据确定式 20.10 力还原矩阵中的全部 48 个元素。由于耦合作用,必须确定  $R_F$  矩阵中的所有 48 个非零元素。求得逆标定矩阵  $R_F^*$  便可完成腕力传感器的标定,而  $R_F^*$  满足如下方程:

$$W = R_F^* F \quad (20.12)$$

和 
$$R_F^* R_F = I_{8 \times 8} \quad (20.13)$$

其中  $R_F^*$  为  $8 \times 6$  矩阵,而  $I_{8 \times 8}$  为  $8 \times 8$  单位矩阵。因此,由式 20.12 中  $R_F^*$  的逆阵用最小二乘拟合法便可求得式(20.9)中的标定矩阵  $R_F$ 。用  $(R_F^*)^T$  左乘式(20.12)可得:

$$(R_F^*)^T W = [(R_F^*)^T R_F^*] F \quad (20.14)$$

对矩阵  $[(R_F^*)^T R_F^*]$  求逆,可得

$$F = [(R_F^*)^T R_F^*]^{-1} (R_F^*)^T W \quad (20.15)$$

比较式(20.9)和(20.15)可知

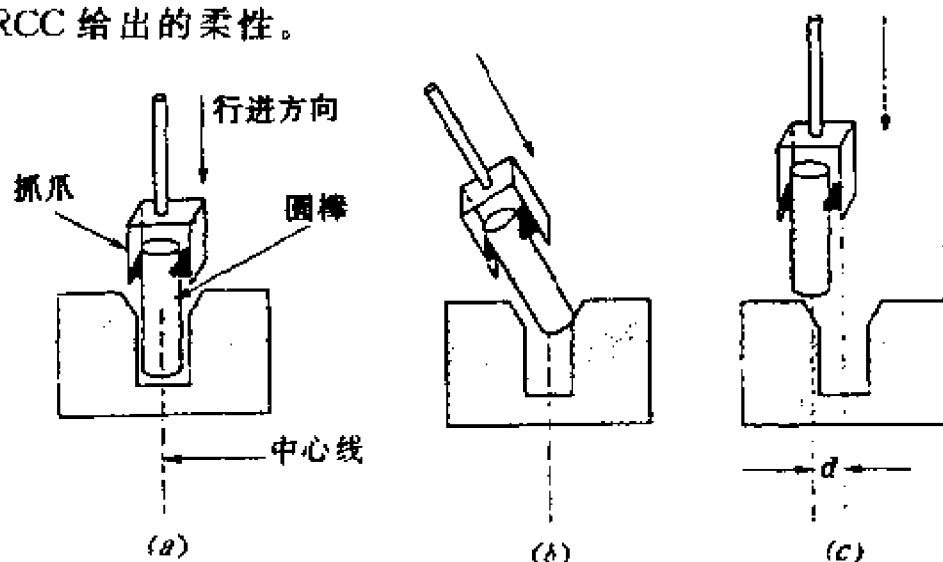
$$R_F \cong [(R_F^*)^T R_F^*]^{-1} (R_F^*)^T \quad (20.16)$$

用沿传感器坐标系各轴设置已知重量的方法,可确定矩阵  $R_F^*$ 。

## 20.10 柔性和装配操作

机器人抓握物体时,控制器利用传感器获取的信息调节抓爪力、压力或转矩,从而避免物体滑动或被压坏。但是,除抓握物体外,机器人还要进行其他操作,从而要求不同类型的力调节。如图 20.15(a)所示,将圆棒插入孔内时,正常情况下,机器人抓爪沿孔中心线下降,从而使圆棒正确地插入孔中。实际上,如图 20.15(b)和 20.15(c)所示,圆棒和孔壁之间存在的间隙会阻止圆棒正确地插入,从而使抓爪难于正确定位。这样,机器人的刚性会导致部件或机器人受损,以致关节暂停工作。解决这一问题的办法是在

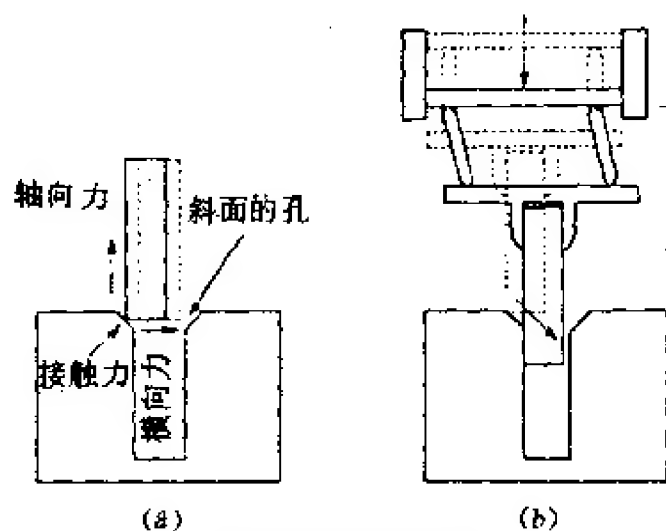
抓爪和腕凸缘之间设置所谓遥控中心柔性(RCC)的被动元件。美国 Lord 公司制作了几乎能满足机器人任何柔性要求的一系列装置,它们兼备高轴向刚性(沿插入力方向),以及横向和扭转刚性(垂直或围绕插入方向)。改变层状橡胶弹性元件的性能,就能改变 RCC 给出的柔性。



(a) 机器人抓爪沿孔中心线插入圆棒;(b) 抓爪与孔中心线成一定角度下降时插入圆棒,导致咬合;(c) 抓爪平行于孔中心线下降,偏离中心线一段距离  $d$

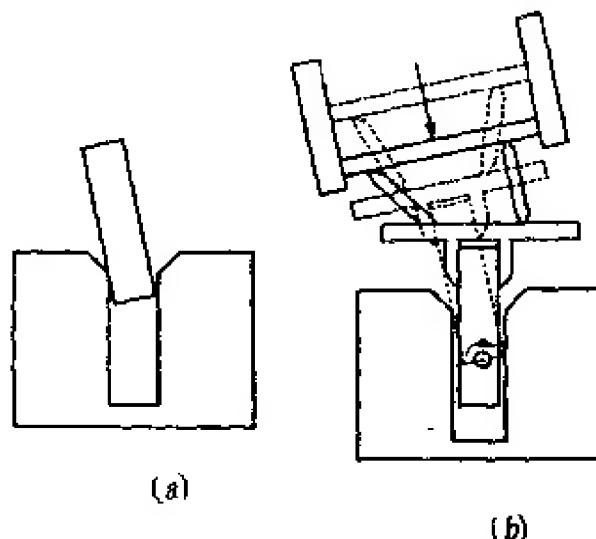
图 20.15 机器人将圆棒插入孔中的操作

用“柔性中心”或“弹性中心”这一术语描述转矩产生的旋转。横向平动仅在弹性中心加横向力时才产生作用。如图 20.16 和 20.17 所示,RCC 适用于两种垂直类型的装配操作。圆棒偏离孔时,如图 20.16(a)所示,斜面产生横向力。该力被柔性中心感知,RCC 使轴横向平移,如图 20.16(b)所示,直至圆棒能顺利插入孔中。圆棒与孔为非平行失调时,如图 20.17(a)所示,圆棒与孔壁的咬合产生一转矩。该转矩产生围绕柔性中心的旋转,如图 20.17(b)所示,直到轴跟孔在一直线上。尽管 RCC 是一种被动器件,不能实际监控由于失调产生的力,但是,该器件是利用这种力来平移抓爪,使其跟孔处于一个方向,从而降低咬合力,达到校正失调的目的。



(a) 偏离产生的横向力;  
(b) RCC 使圆棒产生横向  
平移, 从而插入圆棒

图 20.16 插入操作中通过 RCC 校正偏离位置



(a) 圆棒非平行失调导致孔壁的咬合;  
(b) 合成转矩产生围绕 RCC 的柔性中心  
的旋转, 使圆棒和孔的中心线一致

图 20.17 通过 RCC 校正非平行失调

两个部件间的失调引起转矩和力, 通过 RCC 中不同类型的位移传感器可获得跟转矩和力成比例的电信号。该信号可用作力或转矩的反馈。这种设计的传感器称 IRCC (I 代表仪器), 有这种功能的传感器已由 MIT Draper 实验室研制成功。这类传感器能测量

坐标系  $x$  和  $y$  的平移和旋转位置,而坐标系的  $Z$  轴沿 RCC 和工具指向。也就是说,这类传感器有四个自由度 (DOF)。首批这种类型的传感器有两个,一个使用四个 Kaman scientific 接近传感器作为主动元件,另一个的每个自由度使用 Reticon 线性二极管阵列、薄金属栏和 LED 光源,阵列中照明光电二极管的号码给出光栏位置。这两个传感器校正困难,且成本高,故不适合工业生产应用。

适用传感器仅有三个自由度(即  $X$ 、 $Y$  和  $Q_z$ ,  $Q_z$  代表绕  $Z$  轴旋转)。三个位置传感器都由 LED 和光电二极管构成,并安装在 Lord 公司的 RCC 上。光电二极管差动连接, RCC 的位移产生跟零位置偏离成比例的信号。这种传感器用于 PUMA 600 机器人的腕部,利用 VAL 机器人程序语言通过 I/O 微型组件跟机器人控制器接口。

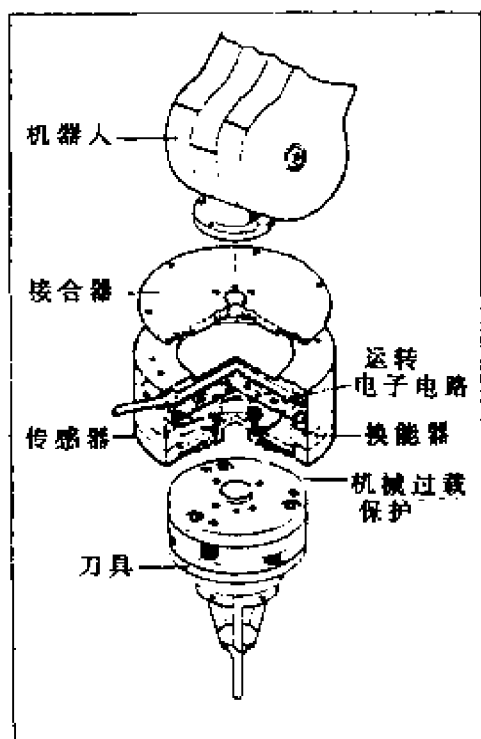


图 20.18 商用仪表式的遥控  
中心柔性

用这种传感器进行了无斜面插入、跟踪边缘和焊缝跟踪等应用试验。第一个应用试验是插入试验,例如,木钉插入孔使用 IRCC 作为触觉传感器,孔轴跟木钉构成  $10^\circ$  倾斜,木钉接触孔壁,使用 IRCC 的被动柔性即可将木钉插入孔中。第二个应用试验是跟踪边缘,传感器提供用于调节  $Y$  位置的力信息,从而通过旋转切割工具将  $0.454 \sim 0.9\text{kg}$  的力施加给胶合板。 $Z$  轴垂直于材料表面,刀具沿刀具  $X$  方向的接口运动。大部件由于采用 PUMA 的 I/O 线路,产生的跟踪速度有限 ( $300\text{mm/min}$ ),故传感器的

取样信号不适当。被动 RCC 仅有一个相当小的动态范围(约

±2.54mm),故边缘跟踪能力被严格限制。因此,仪表装置大大地扩展了这个范围。第三个应用是焊接跟踪,因为跟踪焊缝需要跟两个表面保持稳定接触,故要求在整个弧焊过程中 IRCC 提供二维力信息。问题是采样速率限制了跟踪速率(约 280mm/min)。

Barry Wright 公司研制了如图 20.18 所示的六轴 IRCC。六个箔型应变片设置在标准 RCC 上,FS6-120A 提供跟三个力(11~68kg)和三个力矩(0.2~1.2m·kg)成比例的电信号。这种传感器约重 0.454kg,内装将信息转入用户规定的正交坐标系的微处理机。为了完成这项工作,每个应变片电桥的输出经过缓冲、低通滤波,然后输入到 6:1 的多路调制器。12 位 DAC 使数据数字化,以便微处理机进行处理。模拟和数字输出都能跟机器人控制器接口。

# 第二十一章 陀 螺

陀螺的功能是敏感运动体的角度、角速度和角加速度。利用陀螺的定轴性和进动性可测量运动体的姿态角(航向、俯仰、滚动),精确测量运动体的角运动,通过陀螺可以组成各种陀螺稳定装置。

陀螺已有 100 多年的发展史,1910 年首次用于船载指北陀螺罗经。第二次世界大战期间,德国将陀螺用于 V-2 火箭上,自那时起,为了提高它的性能价格比,科技工作者投入了大量的人力物力,各种新型陀螺不断问世。当今陀螺已进入了第四代,即静电陀螺、激光陀螺、光纤陀螺和振动陀螺。第一代是滚珠轴承支承马达和框架的陀螺,第二代是 40 年代末到 50 年代初发展起来的液浮和气浮陀螺,第三代是 60 年代以后发展起来的干式动力挠性支承的转子陀螺。

不同类型的陀螺性能价格比不一样,而兵器、舰船、导弹、飞机和机器人等不同应用领域,对陀螺的性能价格比要求也不一样,至今多种陀螺在不同领域广泛应用<sup>[6,8~13]</sup>。因此,我们只能说一种新型陀螺的出现弥补了原有某种陀螺的缺陷,从而满足了某一应用领域的要求,而不能说某种陀螺的出现代替了其他陀螺。

## 21.1 框架式陀螺

早期的框架式陀螺的轴承用滚珠支承;为了减少轴承磨擦力矩,后来人们研制了用气浮和液浮支承的陀螺。前者称滚珠轴承式框架陀螺,是第一代陀螺;后者称浮动式框架陀螺,是第二代陀螺。



### 21.1.1 单轴框架陀螺

单自由度陀螺的结构原理如图 21.1 所示,其由高速转子(轴承支承)、浮子结构、输出轴轴承、传感器、力矩器、支承、阻尼器和陀螺壳体组成。当不考虑转子的转动自由度时,陀螺转子轴只有一个绕输出轴的转动自由度,故称其为单自由度陀螺,又称单轴陀螺。

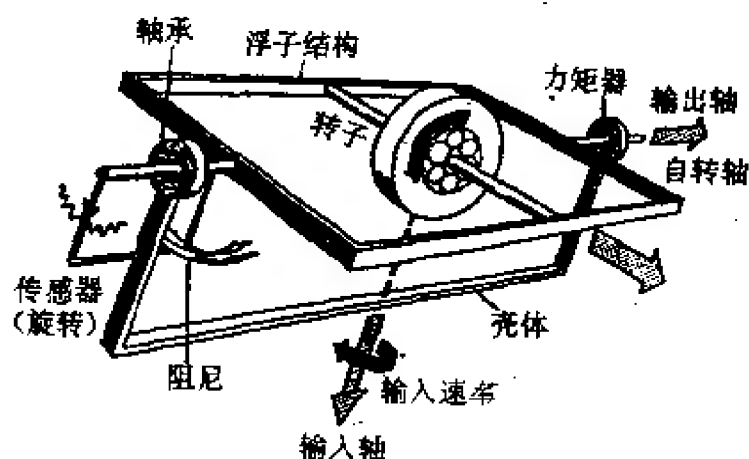


图 21.1 单自由度陀螺的结构原理

绕输入轴相对陀螺壳体输入一个旋转速率时,在与输入轴成 90 度的方向产生一个陀螺力矩,在陀螺力矩作用下陀螺的浮子绕输出轴转动。图 21.1 中的传感器有一对交流线圈,一个固定在壳体上,另一个固定在浮子上,故可检测浮子相对壳体的转动角度。

力矩器是用来对陀螺施加控制力矩的,它的转子固定在浮子上,定子固定在壳体上。当控制线圈通以控制电流时,力矩器便产生电磁控制力矩,产生的力矩可以控制陀螺运动,还可以补偿有害力矩,减小陀螺漂移。

阻尼器是由圆柱形浮子和圆柱形壳体之间的环形小间隙,并充以一种高比重高粘度系数的氟油形成的,它不仅可以减小支承的负载,同时使其隔离冲击振动,还可提供所需的阻尼力矩。

### 21.1.2 双轴框架陀螺

与单自由度陀螺相比,双轴框架陀螺的转子轴具有两个转动自由度。它是由转子、内框架和外框架以及三对轴承所组成,转子轴内、外环轴相互垂直。当转子高速旋转时,转子轴相对惯性空间保持稳定不动。它可提供两根测量轴,检测机体相对惯性空间的转动角度。当给陀螺转子施加控制力矩时,则陀螺转子轴可指令规律进动。

双自由度陀螺的结构原理如图 21.2 所示,在陀螺转子支承件和壳体间加一个中间平衡环,使陀螺有第二个旋转自由度。因有两条平衡环轴,故壳体可绕轴 A 或轴 B 倾斜而不干扰转子自转轴的空间方位。

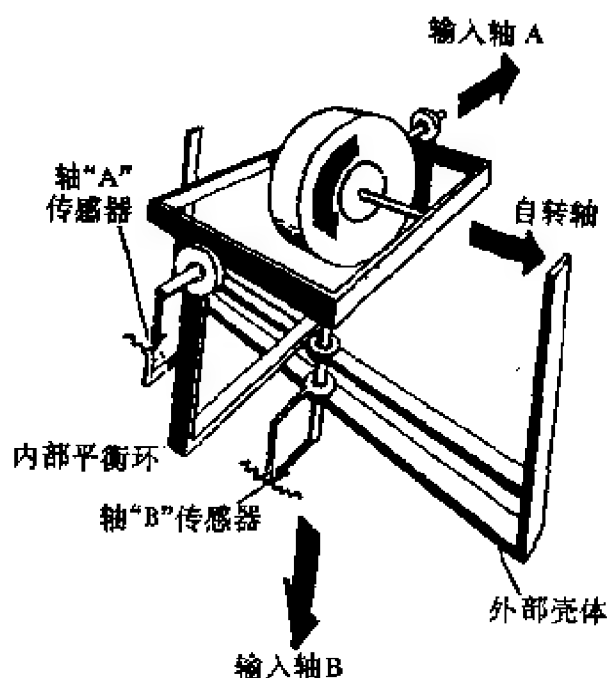


图 21.2 双自由度陀螺的结构原理

壳体的倾斜即是对稳定平台的角干扰,传感器检测出干扰信号,并将误差信号送到平台伺服回路,从而将角干扰减小到零。与单自由度陀螺相似,转子安装在精密轴承上,并以高速(1200~

2400r/min)转动,像平衡在弦线上的玩具陀螺那样,转子的角动量使其在惯性空间保持稳定。

## 21.2 挠性陀螺

挠性陀螺是一种精度高而又结构简单的低成本陀螺。挠性陀螺的转子由挠性接头支承,挠性接头是一种无摩擦的弹性支承。最简单的挠性接头支承转子的结构是如图 21.3 所示的细颈轴,转子借助挠性接头与驱动轴相连。驱动电机带动驱动轴经过挠性接头使转子高速旋转,从而产生陀螺角动量  $H$ 。挠性接头允许转子绕垂直于自转轴的两个正交轴方向旋转,因接头很“柔软”,故转子可获得绕这两个正交轴的转动自由度。也就是说,挠性陀螺的转子有三个转动自由度,而自转轴有两个转动自由度。若按自转轴的转动自由度计算,挠性陀螺属双自由度陀螺。因此,挠性陀螺也具有前述两自由度陀螺的进动性和稳定性。

根据上述挠性支承原理构成的挠性陀螺如图 21.4 所示,其主要由磁滞电动机、驱动轴、细颈式挠性接头、转子、信号传感器和力矩器等构成。

挠性陀螺和框架陀螺一样,也有一个高速旋转的转子,但两者的支承形式完全不同,挠性支承消除了支承带来的摩擦,故挠性陀螺易实现低漂移,其精度与液浮陀螺相当,且成本低于液浮陀螺。因此,挠性陀螺发展十分迅速,已在惯导系统中获得应用。简易平台惯导系统用 TN-02 型挠性陀螺的主要技术指标<sup>[12]</sup>:(1)陀螺随机漂移误差  $<0.5^{\circ}/h(1\sigma)$ ;(2)逐日漂移  $<3^{\circ}/h$ ;(3)体积  $\phi 50 \times 60\text{mm}$ ;(4)重量  $<400\text{g}$ 。

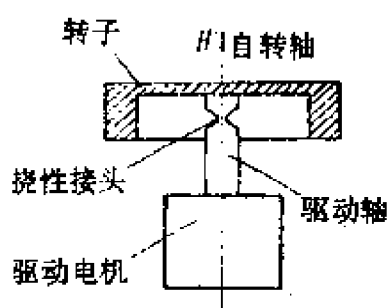


图 21.3 挠性陀螺的工作原理示意图

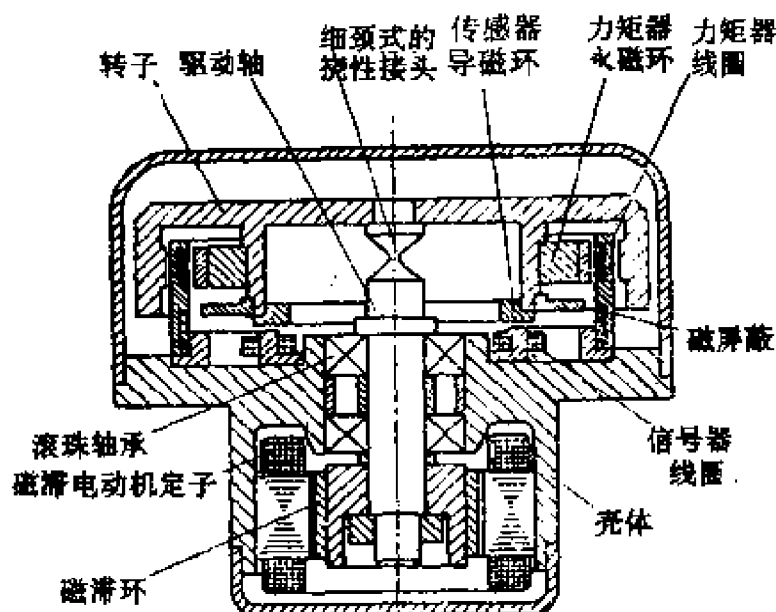


图 21.4 细颈式挠性陀螺的结构原理图

### 21.3 动力调谐式挠性陀螺

动力调谐式挠性陀螺的驱动轴与转子之间的挠性接头已不是前述挠性陀螺的一根细颈轴,而是由两对相互垂直的扭杆和一个平衡环组成,如图 21.5 所示。一对共轴线的内扭杆与驱动轴及平衡环固连,另一对共轴线的外扭杆与平衡环及转子固连。内扭杆轴线垂直于驱动轴轴线,外扭杆轴线垂直于内扭杆轴线,并且内外扭杆轴线与驱动轴线相交于一点。

驱动电机使驱动轴旋转时,驱动轴通过内扭杆带动平衡环旋转,平衡环再通过外扭杆带动转子旋转。转子绕内扭杆轴线有转角时,通过外扭杆带动平衡环一起绕内扭杆轴线偏转,这时内扭杆产生扭转弹性变形。转子绕外扭杆轴线有转角时,还不能带动平衡环绕外扭杆轴线偏转,仅是外扭杆产生扭转弹性变形。由内外扭杆和平衡环组成的挠性接头,一方面起支承转子作用,另一方面又提供所需的转动自由度。因此,内外扭杆绕其自身轴线应具有低的扭转

刚度,而绕与内外扭杆轴线垂直的方向应具有高的抗弯刚度。

动力调谐式挠性陀螺的结构原理如图 21.6 所示。动力调谐式挠性陀螺,除挠性接头与挠性陀螺的细颈式挠性接头不同外,其余部分如磁滞电动机、驱动轴、转子、信号传感器和力矩器等,仍然与细颈式挠性陀螺的基本相同。由图可以看出,挠性接头设置在转子的内腔,工作时平

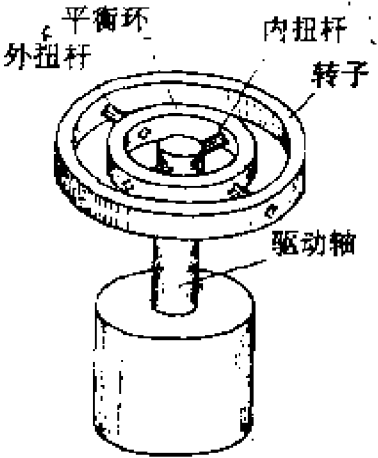


图 21.5 动力调谐式挠性陀螺的挠性接头

衡环和内外扭杆随同转子一起高速旋转。信号传感器用于检测仪表壳体相对自转轴的转角,一般用电感式传感器或电容式传感器,图中所示的是电感式传感器,其导磁环固装在转子上,而铁芯和线圈固装在表壳上。力矩器用于将控制力矩施加给陀螺,一般用永磁式力矩器或涡流环式力矩器,图中所示的是永磁式力矩器,其永磁环固装在转子上,线圈固装在表壳上。为了防止扭杆的扭转角度过大,在驱动轴上有限动器,它可限制陀螺的工作转角。

动力调谐式挠性陀螺的挠性接头支承转子与挠性陀螺的细颈式挠性接头支承完全相同。自转轴与驱动轴之间出现相对偏角时,由于扭杆的扭转变形,同样会产生弹性力矩作用到转子上,即它同样具有机械弹簧效应。但是,这种挠性接头又与细颈式挠性接头不同,自转轴与驱动轴之间出现相对偏角时,由于平衡环的振荡运动,它会产生一个与机械弹性力矩方向相反的负弹性力矩作用到转子上,即为动力调谐补偿力矩。动力调谐陀螺按使用方法可分成自由陀螺和速率陀螺两种,自由陀螺仪用于平台惯导系统,速率陀螺用于捷联惯导系统,又称捷联式陀螺。

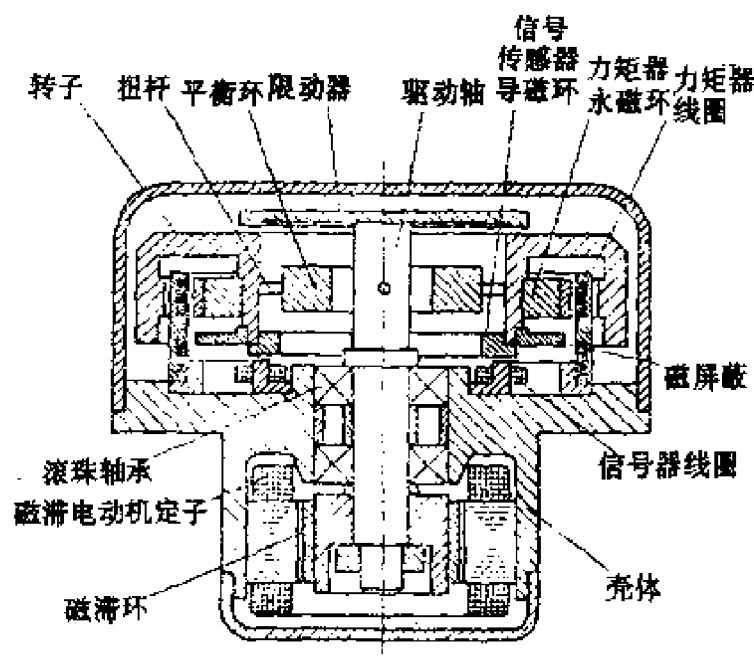


图 21.6 动力调谐式挠性陀螺的结构原理图

## 21.4 静电陀螺

前述框架式陀螺、挠性陀螺和动力调谐式挠性陀螺都是用机械方法支承转子，而下述静电陀螺的转子则是由静电吸力支承。静电陀螺的转子做成球形，将其置于超高真空的强电场内，由强电场产生的静电吸力悬浮。

### 21.4.1 静电悬浮的基本原理

如图 21.7 所示，在球形金属转子的对称方向配置一对球面电极，球形转子与球面电极之间的间隙很小，球面电极上接通高电压时球形转子的电位为零。因此，在电极与转子之间可形成场强很高的均匀静电场。电极带正电时，静电感应使转子对应表面带负电，由于正电与负电的相互吸引而产生静电吸力。电极带负电时，静电感应使转子对应表面带正电。正电与负电的相互吸引也会产生静电吸力，电极为正电与负电交替变化时，转子对应表面负电与正

电也交替变化,仍然产生静电吸力。图 21.7 中,右边电极对转子的静电吸力  $F_1$  使转子趋向右边移动,左边电极对转子的静电吸力  $F_2$  使转子趋向左边移动。

显然,若电极上的电压是不可调节的固定值,则起不到支承转子的作用。因为当转子相对电极有一个位移时,转子与对应两个电极之间的间隙起了变化,间隙变小一端的电极对转子的静电吸力增大,而间隙变大的一端的电极对转子的静电吸力减小,

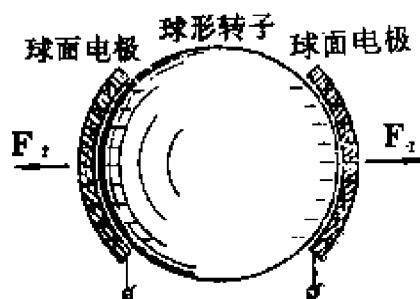


图 21.7 球面电极对球形转子的静电吸力

这样,转子被吸引向间隙变小的那一端电极,从而失去支承作用。因此,转子出现位移时,必须自动调节对应两个电极施加的电压大小,使间隙变小一端电极上施加的电压减小,从而减小静电吸力,并使间隙变大一端电极上施加的电压增大,以便使静电吸力增大,这样才能将转子拉回到中间位置而起到支承转子的作用。

#### 21.4.2 静电陀螺的工作原理

静电陀螺的工作原理如图 21.8 所示。若沿三个正交轴方向在球形转子外面配置三对球面电极,即球形转子的左右、前后和上下方向都配置一对球面电极,且每对电极上加的电压均可自动调节,则球形转子被支承在三对球面电极的中心位置。实际静电陀螺的转子用铝或铍等比重小的金属做成空心或实心球体,并放置在陶瓷壳体的球腔内,球腔壁上用陶瓷金属化办法制成三对球面电极。通过支承控制线路敏感转子相对电极的位移,并自动调节加到各对应电极上的电压大小。

为了得到较大的静电吸力以便支承转子,电极与转子之间的电场强度应足够高,一般要求达到  $20 \sim 400 \text{ kV/cm}$ 。因电场强度与电极上的电压成正比,而与电极-转子之间的间隙成反比,故电极

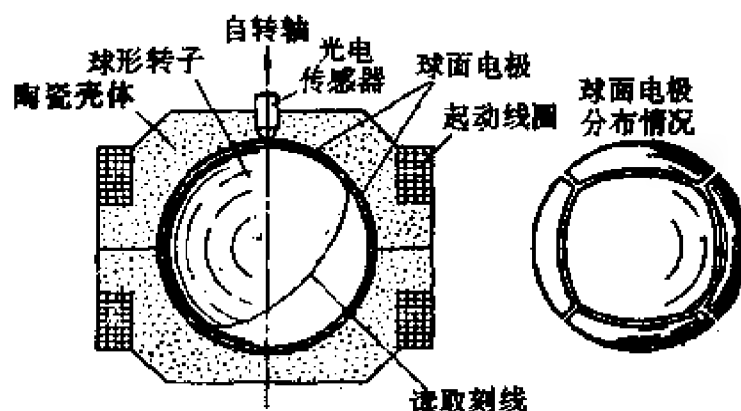


图 21.8 静电陀螺的工作原理示意图

上的电压一般加到 1000V 以上,电极-转子之间的间隙一般仅为  $5\mu\text{m}$ 。

为了防止高电场强度下转子-电极之间发生高压击穿,同时减小转子转动时受到的气体阻尼,陶瓷球腔内需维持超高真空状态,真空度一般达  $10^{-6}\sim 10^{-8}\text{mmHg}$  ( $1\text{mmHg}=133.332\text{Pa}$ )。在这样的超高真空条件下,转子由起动线圈作用而达到额定转速(约每分钟数万转)后则靠惯性运动,其持续时间可达几个月至几年。

静电支承的转子能自由地绕三个正交轴方向转动,即转子有三个转动自由度,且转角范围不受限制。静电陀螺的自转轴有两个转动自由度,若按自转轴的转动自由度计算,它属两自由度陀螺。显然,静电陀螺也具有前述两自由度陀螺的基本特性——进动性和稳定性。静电陀螺的壳体转动时,其自转轴相对惯性空间仍保持原方位。在转子表面上刻线,通过光电传感器即可测得壳体相对自转轴的转角。

### 21.4.3 静电陀螺的特点与用途

静电陀螺消除了机械连接及气体或液体振动引起的干扰力矩,从而使陀螺随机漂移达  $0.01\sim 0.001^\circ/\text{h}$ 。这种陀螺仅一个活动部件——高速转子,故结构简单,可靠性高。静电陀螺自转轴相对仪表壳体时转角范围不受限制,故可全姿态测角。静电陀螺能承



受较大的振动和冲击,并且一个静电陀螺还具有三个加速度传感器功能。

静电陀螺可用作平台式和捷联式惯性导航系统的传感器,例如舰船、潜艇、飞机和导弹的惯性制导系统。

## 21.5 激光陀螺

激光陀螺是利用闭合光路中逆、顺两方向运转两激光束的激光谐振频率差检测相对惯性空间的转速和方向,功能与机械陀螺相同,但无机械转子。因其有许多优点和广泛的应用前景,1962年美、英、法、苏等国几乎同时开始研制,并先后于70年代末或80年代初试制成功。我国各有关部门对激光陀螺的研制与应用投入了大量人力物力,现已用于智能机器人惯导系统。

### 21.5.1 无源塞格涅格干涉仪

利用 Sagnac 效应测量物体相对于惯性坐标系的转动角速度的装置称 Sagnac 干涉仪。图 21.9 是理想的 Sagnac 干涉仪示意图。光在 A 点入射,并被半透半反射镜 SP 分成两束,设法使反射光沿半径为  $R$  的圆形路径向逆时针方向传播,而透射光沿着相同的圆形路径向顺时针方向传播。经过一周后,这两束相反方向传播的光又在半透半反射镜处会合。当干涉仪不转动时,这两束光传播一周的时间是相等的,即

$$t = \frac{2\pi R}{c} \quad (21.1)$$

式中  $c$  是光的传播速度。

干涉仪以角速度  $\Omega$  相对惯性坐标系顺时针方向转动时,对于随同干涉仪一起转动的观察者来说,这种对称性将被破坏,顺、逆光程就产生差异,两束光传播一周的时间不等,因为在一段时间内半透半反射镜已从 A 点转到了 B 点。对顺时针方向传播的光束来

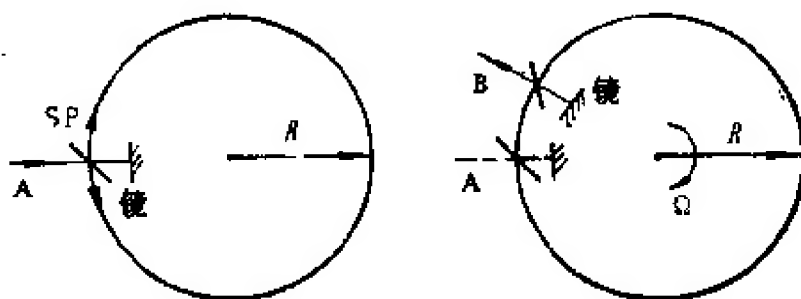


图 21.9 Sagnac 干涉仪工作原理示意图

说, 当它再次到半透半反射镜时多走了段 AB 路程, 因此所需的时间

$$t_{cw} = \frac{2\pi R + \Omega R t_{cw}}{c}$$

由此得

$$t_{cw} = \frac{2\pi R}{c - \Omega R}$$

同理可以求得逆时针方向传播的光束再次到达半透半反射镜时所需时间

$$t_{ccw} = \frac{2\pi R}{c + \Omega R}$$

两光束传播一周的时间差

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} = \frac{4\pi\Omega R^2}{c^2 - \Omega^2 R^2}$$

因为  $c^2 \gg R^2 \Omega^2$ , 所以

$$\Delta t = \frac{4\pi\Omega R^2}{c^2}$$

于是可得两束光再次在半透半反射镜处会合时的光程差

$$\Delta L = \Delta t \cdot c = \frac{4\pi\Omega R^2}{c} \quad (21.2)$$

由于环形所包围的圆面积为  $S = \pi R^2$ , 所以

$$\Delta L = \frac{4S}{c} \Omega \quad (21.3)$$

可以证明上式对任意形状的平面环形腔适用。S 为环形腔所包围的面积。

式 21.3 说明两束光的光程差与干涉仪相对惯性坐标系的转动角速度  $\Omega$  成正比,只要测出光程差,就能测得  $\Omega$ 。

1925 年麦克斯逊与盖勒根据上述原理用矩形环形腔干涉仪测定地球转动角速度。这个环形腔为  $600 \times 300 \text{m}^2 = 1.8 \times 10^9 \text{cm}^2$ ,对  $\Omega = 15^\circ/\text{h}$  (地球自转角速度,化成弧度/秒),可得

$$\Delta L = 0.174 \text{m} \approx \frac{\lambda}{4}$$

式中  $\lambda$  用  $0.7 \text{m}$ 。

当光每差一个波长,干涉条纹就移动一个,故以上结果说明只移动  $1/4$  个条纹,这种环形腔干涉仪没有什么实际意义。

### 21.5.2 激光陀螺的工作原理

激光出现以后,将激光增益引入环形腔,做成激光振荡器,这样极大地提高了测量转动角速度的灵敏度,这种装置就是激光陀螺。

图 21.10 示出带增益管的三角形谐振腔。增益管内是通电激发的氪-氟气体,它是激发能源,因此谐振腔是有源腔。其中  $M_1$ 、 $M_2$  是具有高反射率的多层介质平面膜片; $M_3$  是高反射球面片; $M_4$  是具有高透射率的多层介质膜增透片。通以适当的电流以后增益管处于受激状态。调整环路,并使光子靠近增益毛细管中心轴通过,则光子绕一圈后仍回到原处。端面镜片  $M_4$  使经过它的光子变成线偏振光,因而,光子绕一圈回原处相位差是  $2\pi$  的整数倍,各圈激发产生的光子同相位,叠加结果才能使光强极大地加强而产生激光。

与无源 Sagnac 干涉仪相似,在环形谐振腔中产生相反方向(顺时针方向和逆时针方向)沿环路传播的两束激光,它们都以同一频率沿顺时针和逆时针绕行环路。激光振荡频率

$$\nu = q \frac{c}{2\pi d}$$

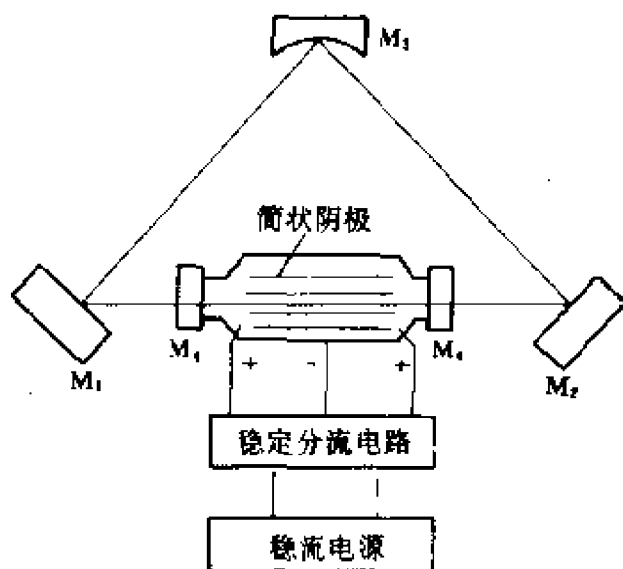


图 21.10 激光陀螺谐振腔示意图

式中  $q$  为任意整数,  $2\pi d$  为激光在谐振腔中来回一次的光程。对环形谐振腔来说,  $2\pi d$  应该用激光沿环路传播一周的光程  $L$  来代替, 因此

$$\nu = q \frac{c}{L} \quad (21.4)$$

谐振腔在环路平面内以角速度  $\Omega$  转动时, 两相反方向传播的激光束的光程不同, 这两束激光的振荡频率也不同, 产生一个频率差。以

$\nu_{cw}$ 、 $L_{cw}$  和  $\nu_{ccw}$ 、 $L_{ccw}$  分别表示顺时针和逆时针方向激光束的频率和光程, 则

$$\begin{aligned} \nu_{cw} &= q \frac{c}{L_{cw}} \\ \nu_{ccw} &= q \frac{c}{L_{ccw}} \end{aligned} \quad (21.5)$$

两激光束的频率之差  $\Delta\nu$  称为频差, 且为

$$\Delta\nu = |\nu_{cw} - \nu_{ccw}| = \left| qc \left( \frac{1}{L_{cw}} - \frac{1}{L_{ccw}} \right) \right| = qc \frac{\Delta L}{L_{cw} L_{ccw}}$$

式中  $\Delta L$  为两激光束在谐振腔中传播一周的光程差, 由上式可得

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{qc\Delta L}{\nu L_{cw} L_{ccw}}$$

将式(21.4)代入上式得

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = L \frac{\Delta L}{L_{cw} L_{ccw}}$$

因为  $\Delta L = L_{cw} - L_{ccw}$ ,  $L_{cw} = L + \frac{\Delta L}{2}$ ,  $L_{ccw} = L - \frac{\Delta L}{2}$ , 代入得

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = L \cdot \frac{\Delta L}{L^2 - \frac{(\Delta L)^2}{4}}$$

由于  $L^2 \gg \frac{(\Delta L)^2}{4}$ , 故可得

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta L}{L} \quad (21.6)$$

将式(21.3)代入式(21.6)得

$$\Delta \nu = \frac{4S}{L\lambda} \Omega \quad (21.7)$$

式中,  $S$  和  $L$  分别为环形谐振腔光路包围的面积和周长,  $\lambda$  是谐振腔静止时激光的波长, 它们均是常数, 因此频差  $\Delta \nu$  与  $\Omega$  成正比, 即

$$\Delta \nu = K \Omega \quad (21.8)$$

式中  $K = \frac{4S}{L\lambda}$

$K$  称为激光陀螺的刻度系数。国内常用的周长  $L=400\text{mm}$  的正三角形环路用  $0.6328\mu\text{m}$  波长就可得

$$\frac{4S}{L\lambda} = 2120\text{Hz}/(^{\circ}/\text{s}) \quad (21.9)$$

因此, 测出频差就可算出角速度  $\Omega$ 。对于有源腔, 频差就是两束激光之间拍频; 对于无源腔, 可寻找一种探测频差的方法。

将式(21.8)两边对时间  $t$  积分一次, 可得拍频振荡周期数  $N$ , 它与转角成正比, 即

$$N = \int_0^t \Delta \nu dt = \frac{4S}{L\lambda} \theta \quad (21.10)$$

用电子线路将每个振荡周期变成一个脉冲, 通过检测  $N$  可得  $\theta$ 。图 21.11 为测量角速度和角度的方框图。

式 21.9 的刻度系数的数值可化成其他单位, 常用的有

$$\begin{aligned} \frac{4S}{L\lambda} &= 2.12 \times 10^3 \text{Hz}/(\text{度}/\text{秒}) = 2.12 \times 10^3 \text{脉冲}/\text{度} \\ &= 0.591 \text{Hz}/(\text{度}/\text{时}) = 0.591 \text{Hz}(\text{角秒}/\text{秒}) \\ &= 0.591 \text{脉冲}/\text{角秒} = 7.66 \times 10^5 \text{脉冲}/\text{整周} \end{aligned} \quad (21.11)$$

国外的环路较小, 约为上述数字的一半。

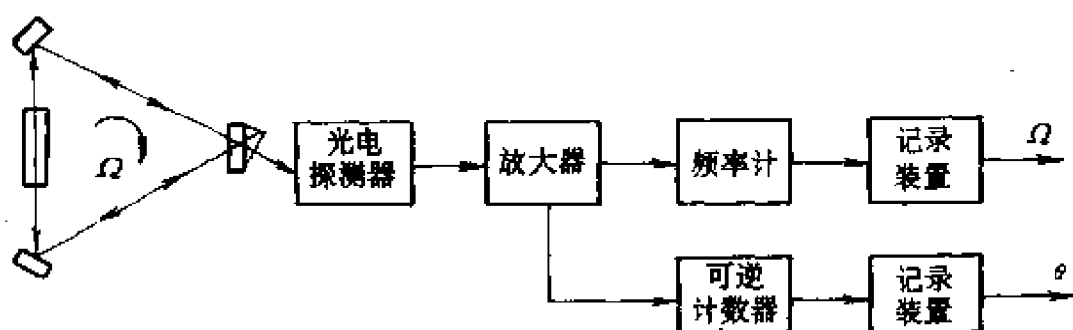


图 21.11 激光陀螺测量角速度和角度的方框图

用式 21.11 规格的刻度系数和地球自转角速度,求得

$$\Delta\nu = 0.591 \times 15 = 8.87(\text{Hz}) \quad (21.12)$$

这个数字可以用仪器准确地测出,它是一个不小的值,仪器可以敏感到 0.005Hz 以下。

用频差与用光程差两种测量方法在灵敏度上的巨大差别,可从式 21.7 与式 21.3 直接比较得出。频差以 Hz 为单位(易准到 0.1 Hz,实际上可准到 0.005Hz),光程差以波长  $\lambda$  为单位(每个  $\lambda$  移动一条纹,可估算到  $\lambda/10$ ),得

$$\frac{\frac{\Delta\nu}{\Delta L}}{\frac{c}{\lambda}} = \frac{c}{L} = \frac{3 \times 10^{10}}{40} = 7.5 \times 10^8 \quad (21.13)$$

可见灵敏度差别非常大,但使用频差方法须要谐振腔。

## 21.6 光纤陀螺

### 21.6.1 工作原理

Vali 和 R. W. Shorthill 1976 年提出光纤陀螺,1985 年国外已有光纤陀螺商品出售,其精度达  $1^\circ \sim 0.1^\circ/\text{h}$ 。

与激光陀螺相比,光纤陀螺结构简单,没有闭锁问题,成本低,易于微型化。尽管光纤陀螺有许多优点,但要达到精度高、满足实用的要求,还需要解决不少技术难题,如克服误差源、扩大动态范

围、提高性能价格比等。

光纤陀螺的基本原理仍然是 Sagnac 效应。由式(21.3)可知,绕垂直于光路平面的角速度  $\Omega$  会产生光程差,与之相应的相位差

$$\Delta\varphi_s = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \Delta L = \frac{4\pi RL}{\lambda_0 c} \cdot \Omega \quad (21.14)$$

式中  $\lambda_0$  是真空中光波长,  $L$  是光路的长度,  $\Delta\varphi_s$  是 Sagnac 相移。

光纤陀螺如图 21.12

所示,用光纤代替由若干反射镜构成的光路,大大增加了光路长度  $L$ ,从而提高了灵敏度。由于光纤可以绕在尺寸小的环上,故可减小光路尺寸。例如,对于光源波长  $\lambda=1\mu\text{m}$ , 光纤长度  $L=1\text{km}$ , 光纤线圈直径  $D=10\text{cm}$ ,  $\Omega=0.1^\circ/\text{h}$ , 可得  $\Delta L=4.5\times 10^{-15}\text{m}$ ,  $\Delta\varphi_s$  为  $10^{-6}\text{rad}$ , 这个量级的相移可用现有的检测技术检测到。

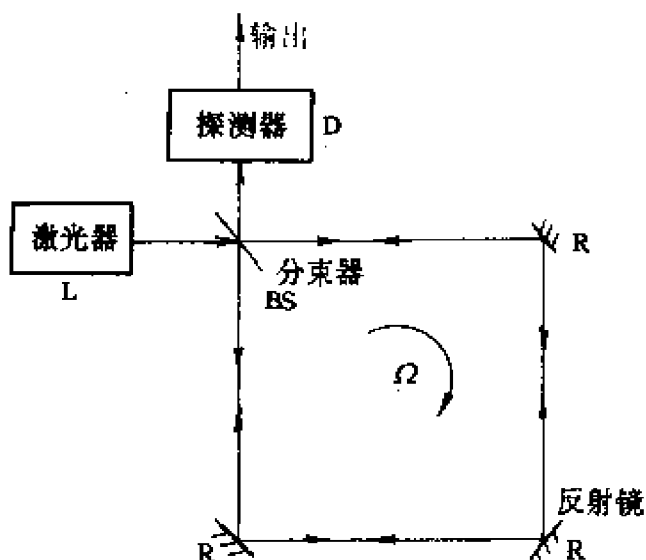


图 21.12 最早的光纤陀螺示意图

在光纤陀螺中,光纤线圈中沿相反方向传输的两束光光程的一致性称为光纤陀螺的互易性。由上面的数值可知,这种互易性要求很高,要想测量  $0.1^\circ/\text{h}$  的角速度,就必须使光纤陀螺在静止时两束光的光程差小于  $4.5\times 10^{-15}\text{m}$ ,或者说非互易相移应小于  $10^{-6}\text{rad}$ 。

图 21.12 所示的光纤陀螺,到达探测器的信号中,顺时针(CW)光通过光纤线圈是两次透过分束器,逆时针(CCW)光通过光纤线圈在分束器两次反射。因此两束光相位差不为零,造成非互易性相移。如果这种非互易性相移是固定的,则光纤陀螺输出显示零偏。由于环境因素的变化,这种非互易相移常是随机性的,这时

光纤陀螺表现出随机漂移。由图看出,返回到光源的信号光中,CW 和 CCW 光在分束器上各经过一次透射和一次反射,它们满足光学互易性,原则上只有它们才能作为光纤陀螺的相位检测信号。

根据以上分析,我们在靠近光源附近再放置一个分束器,将返回到光源的一部分光反射到探测器上,这种光纤陀螺称为“最简结构”光纤陀螺,如图 21.13 所示。目前国外性能较高的光纤陀螺,一般都采用这种光路互易的“最简结构”光纤陀螺方案。

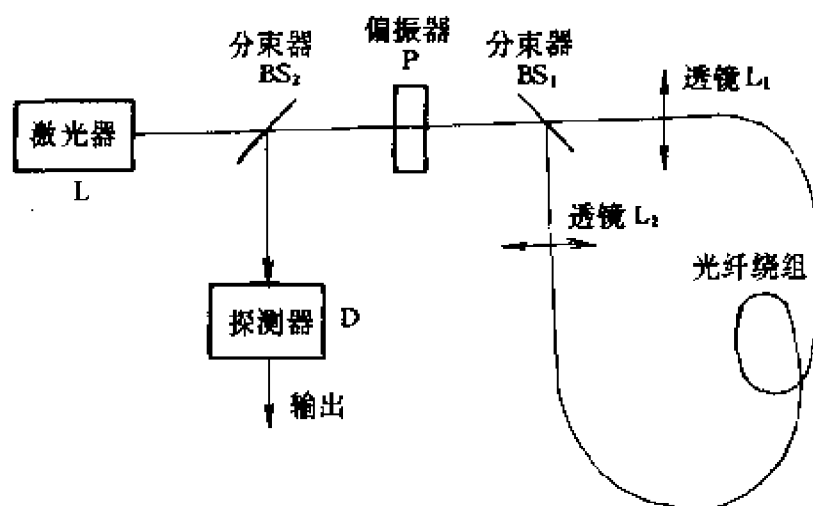


图 21.13 互易光纤陀螺结构

## 21.6.2 全光纤陀螺和集成光学光纤陀螺

全光纤陀螺是用光纤耦合器、光纤偏振器等的光纤陀螺,从而使整个光路连成一个整体,大大提高了稳定性。全光纤陀螺的原理如图 21.14 所示。

集成光学光纤陀螺是将耦合器、偏振器、相位调制器集成在一个光电晶体上,用其代替光纤耦合器、偏振器和调制器,如图 21.15 所示。应用集成光学技术将极大提高光纤陀螺的工作性能,提高可靠性,大大降低光纤陀螺成本,适于批量生产。这是光纤陀螺的一个发展方向。



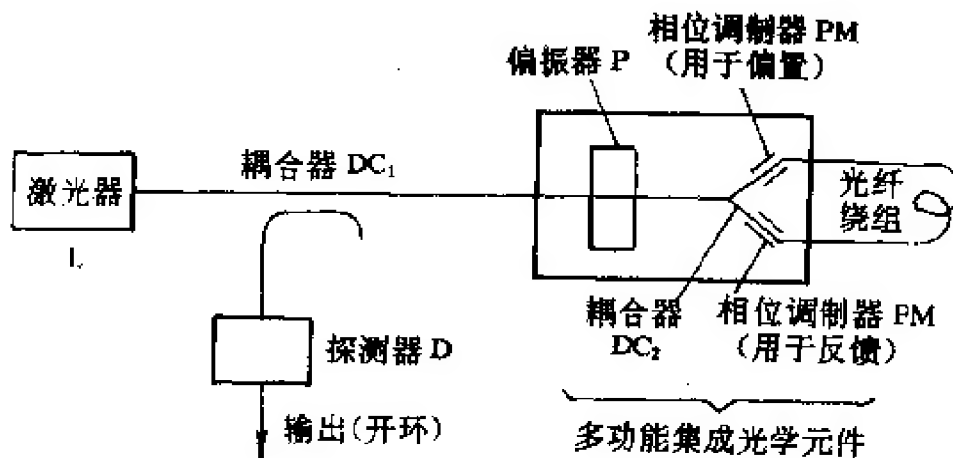


图 21.14 全光纤陀螺的原理图

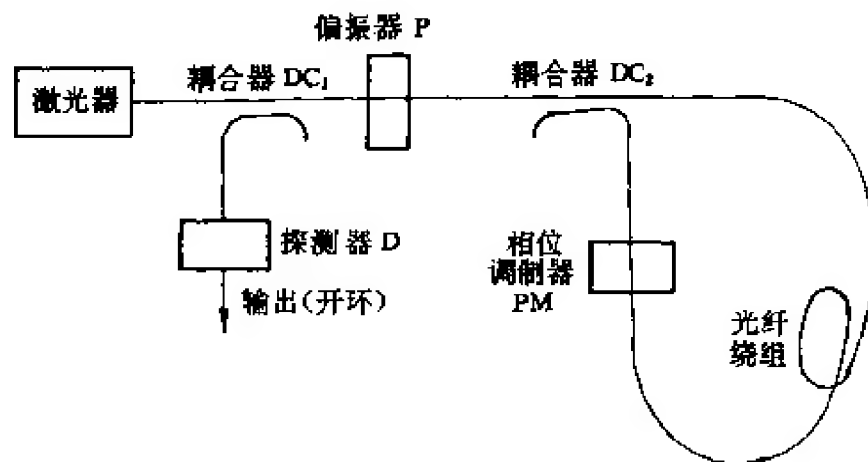


图 21.15 集成光学光纤陀螺示意图

## 21.7 振梁式压电陀螺

压电陀螺是利用晶体压电效应敏感角参量的一种新型固体惯性传感器。压电陀螺消除了传统陀螺的转动部分，故陀螺寿命取得了重大突破，MTBF 达 10000h 以上<sup>[5]</sup>。压电陀螺的出现，其意义不仅是增加了陀螺的一个新品种，更重要的是它的出现改变了陀螺的传统概念。

根据钱学森教授的倡导，我国 1970 年开始研制压电陀螺，目前在航天、航空与舰船等各领域获得了较广泛的应用。1983 年，

“TYSY 型压电晶体速率陀螺”获国家优质产品银质奖,“三轴压电晶体角速率传感器”和压电陀螺用“铋锰锆钛酸铅(PMS)压电陶瓷”均先后获国家发明奖。

### 21.7.1 原理

振梁式压电陀螺的工作原理如图 21.16 所示,电路原理方框图如图 21.17 所示。这种陀螺的心脏元件是一根矩形振梁,振梁材料可以是恒弹性合金,也可以是石英或铌酸锂等晶体材料。在振梁的四个面上贴上两对压电换能器,当其中一对换能器(驱动和反馈换能器)加上电信号时,由于逆压电效应,梁产生基波弯曲振动,即

$$X(t) = X_0 \sin \omega_1 t \quad (21.15)$$

式中  $X_0$  是振动的最大振幅; $\omega_1$  是驱动电压的频率。

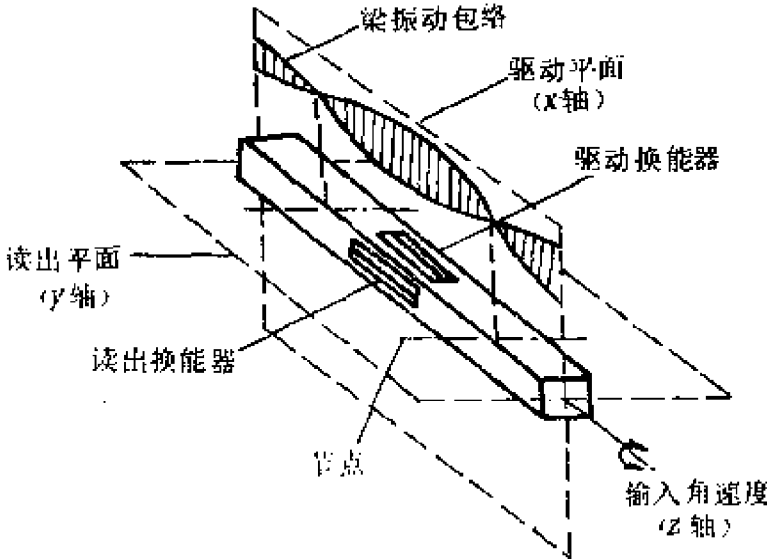


图 21.16 振梁式压电陀螺的工作原理

上述振动在垂直于驱动平面的方向上产生线性动量  $mV$  ( $V$  是质点的线速度,  $m$  是质点的质量)。当绕纵轴( $z$  轴)输入角速度  $\omega_z$  时,在与驱动平面垂直的读出平面内产生惯性力

$$F = -2m(\omega_z \times V) \quad (21.16)$$

惯性力使读出平面内的一对换能器亦产生机械振动,其振幅

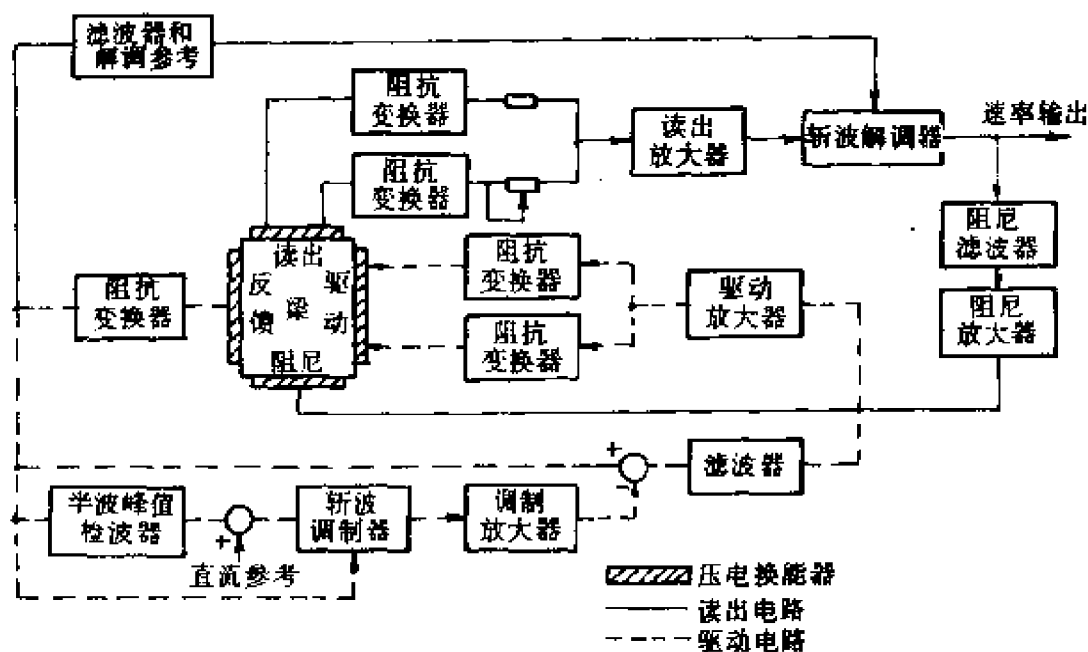


图 21.17 振梁式压电陀螺的电原理方框图

$$y(t) = \frac{2X_0\omega_z}{\omega_c \left[ \left(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_c}{\omega_0 Q_0}\right)^2 \right]^{1/2}} \cos(\omega_c t - \varphi_c) \quad (21.17)$$

式中

$$\varphi_c = \arctan \left[ \frac{\omega_c \omega_0}{Q_0 (\omega_0^2 - \omega_c^2)} \right] \quad (21.18)$$

$\omega_0$  和  $Q_0$  分别是读出平面的谐振频率和机械品质因数。

由于压电效应,惯性力在读出平面内产生的机械振动使读出平面内的压电换能器产生电信号输出。输出电压的量值决定于振幅  $y(t)$ 。由式(21.17)和(21.18)可知,当振梁、压电换能器和驱动电压一定时,输出电信号的大小仅与输入角速度  $\omega_z$  的大小有关。

### 21.7.2 性能

振梁式压电陀螺可用于遥测、增稳和控制系统,不同应用领域要求不同性能的陀螺。表 21.1 给出美国通用电气公司用于 A-10 飞机增稳系统的陀螺典型性能和实测产品性能。

表 21.1 振梁式压电陀螺的典型性能和实测产品性能

	典型性能	实测产品性能
平均故障间隔	137.000h	122.769h
功 率	0.8W	0.6W
分 辨 率	0.01°/s	0.01°/s
灵 敏 限	0.01°/s	0.01°/s
线 性 度	1.0%	1.0%
比 例 系 数	0.1VDC/°/s(可调)	400mV/°/s
线 性 量 程	2000°/s 以下(可调)	±20°/s
零 位 电 压	补偿后为 0.5%	0.025°/s(室温)
零位温度稳定性		0.66°/s
自 然 频 率	30Hz	
交 叉 耦 合	1%	0.8%
滞 后	<0.1%	0.021%
温 度 范 围	-55°~+85℃	-54°~+71℃
振 动 环 境	2000Hz 以下 6g	6.2g(RM)
冲 击	40g	15g
输 出 补 偿		30s
输 出 信 号	DC(运算放大器)	DC
尺 寸	35.56×36.83×77.47mm	35.56×36.83×77.47mm
重 量	111g	272g
输出自测试		±15V 激励,给出 $4 \pm 1^\circ/\text{s}$
输 入 电 压	±12 或 ±15VDC	±5.75VDC
起 动 时 间		2s
寿 命		30y

## 21.8 压电射流陀螺

目前,陀螺的类型有 100 多种,但压电射流陀螺仍受到美、日等发达国家的极大重视。原因是这种陀螺有着传统陀螺不可媲美特点:(1)该陀螺消除了机械陀螺的可动部件,也没有压电陀螺的悬挂系统,因此,其承受过载的能力约比一般陀螺高一个数量级,经 16000g 以上的冲击后还能正常工作,是末制导炮弹不可缺少关键部件;(2)该陀螺阻尼系统响应时间远小于现有各种陀螺,约 50~80ms;(3)该陀螺实际上是一种固态角速率传感器,其寿命主要取决于半导体器件,平均无故障间隔可达 250000h,可靠性为 0.9999995,即其寿命和可靠性比一般陀螺高 1~2 个数量级;(4)该陀螺不需要精密机械加工,所用半导体器件的价格便宜,其成本约为一般陀螺的 1/3~1/2。

### 21.8.1 原理

压电射流陀螺的工作原理如图 21.18 所示,射流是由压电泵激励的一种气态射流束。射流束以恒速度  $V_j$  运动,当绕陀螺输入轴有角速度  $\omega_i$  输入时,则射流束在哥氏惯性力作用下发生偏转,使射流束偏离中心位置。输入角速度越大,偏转角越大。在距离喷嘴  $L$  处设置一对热敏电阻(敏感元件)时,射流束作用在热敏电阻  $R$  上,热敏电阻受射流冷却而发生电阻变化,从而使电桥失去平衡,输出直流电压  $V_o$ 。正比于输入角速度。偏离的量值和方向决定于角速度的矢量特性。由图 21.18 得哥氏加速度

$$\ddot{y} = 2\omega_i v_j \quad (21.19)$$

经两次积分后可得偏离量

$$y = \omega_i v_j t^2 \quad (21.20)$$

一对热敏电阻(敏感元件)设置在距离喷嘴  $L$  处。显然,  $L = v_j t$ , 故还可得到偏离的另两种表达式:

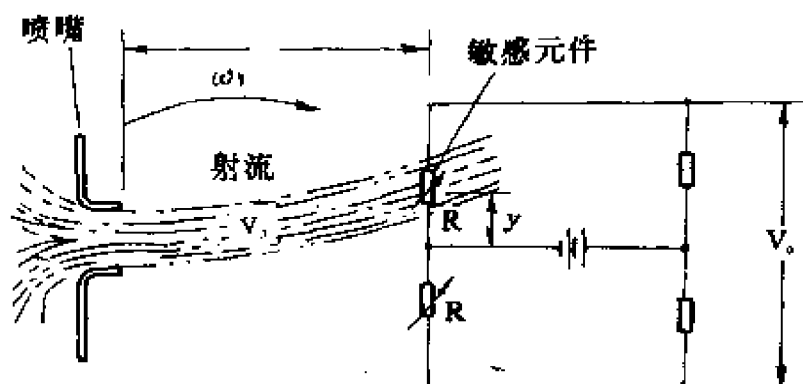


图 21.18 压电射流陀螺的工作原理

$$y = \omega_i L t \quad (21.21)$$

和

$$y = \omega_i \frac{L^2}{v_j} \quad (21.22)$$

由上述偏离量  $y$  的三种表达式可知,流束位置的偏离量正比于垂直射流轴外加的输入角速度的量值。由式 21.21 可看出,在恒输入角速度  $\omega_i$  的条件下,射流的偏离量正比于射流的长度  $L$  和射流迁移时间  $t$  的乘积。由式 21.22 可看出,当射流长度  $L$  和输入角速度  $\omega_i$  一定时,偏离量反比于射流速度  $v_j$ 。

由图 21.18 还可看出,哥氏力使射流束偏离中心位置,并作用在热敏电阻  $R$  上。热敏电阻受射流冷却而发生电阻值变化,从而使电桥失去平衡,输出直流电压  $V$ 。正比于角速度。

### 21.8.2 性能

由前述式 21.22 可知,压电射流陀螺属于一阶惯性环节,故表征其动态特性的重要参数是响应时间。图 21.19 示出笔记录仪记录的压电射流陀螺的响应时间特性,由图可看出,该陀螺的响应时间小于 30ms。

压电射流陀螺能承受高过载。经纵向 16000g 和横向 5000g 的过载试验表明,承受高过载后,产品还能正常工作。

压电射流陀螺的性能可调范围宽,可装调出满足不同使用要

求的产品。表 21.2、表 21.3 和表 21.4 分别列出炮弹、坦克和舰船用压电射流陀螺的性能,它们的敏感轴向和插座接点分配如图 21.20 所示。

表 21.2 PFR-18·2·3·39 型高过载压电射流陀螺性能

动态范围( $^{\circ}/s$ )	500 $\pm$ 100	比例系数( $V/^{\circ}/s$ )	0.0062 $\pm$ 0.002
线性度(%F)	2	噪声灵敏度	可忽略不计
灵敏限( $^{\circ}/s$ )	<0.1	耐冲击(g)	纵向 16000, 横向 5000
分辨率( $^{\circ}/s$ )	<0.1	MTBF(h)	>50000
滞后( $^{\circ}/s$ )	0.1	响应时间(ms)	<80
零位输出( $^{\circ}/s$ )	2	工作温度( $^{\circ}C$ )	-40 $\sim$ +50
零位漂移( $^{\circ}/s/min$ )	0.50	体积(mm)	72 $\times$ 57 $\times$ 50
g 灵敏度( $^{\circ}/s$ )	1.0	重量(g)	420
振动灵敏度( $^{\circ}/s$ )	2( $\sim$ 2000Hz)	电源	$\pm$ 15VDC;250mA
交叉耦合	1.0%		

表 21.3 PFR-123 型动态启动压电射流陀螺性能

动态范围( $^{\circ}/s$ )	$\pm$ 30	MTBF(h)	>10000
线性度(%F)	<1	g 灵敏度( $^{\circ}/s$ )	1.0
灵敏限( $^{\circ}/s$ )	<0.01	噪声灵敏度	可忽略不计
分辨率( $^{\circ}/s$ )	<0.01	响应时间(ms)	<80
滞后( $^{\circ}/s$ )	<0.01	工作温度( $^{\circ}C$ )	-40 $\sim$ +50
零位输出( $^{\circ}/s$ )	0.2	体积(mm)	72 $\times$ 57 $\times$ 50
比例系数(mV/ $^{\circ}/s$ )	>150	重量(g)	420
零位漂移( $^{\circ}/s/h$ )	0.1	电源	$\pm$ 15VDC;250mA
交叉耦合	2.0%		
振动灵敏度(mV)	10(20 $\sim$ 70Hz, 1.5g, 3h)		
耐冲击(g)	40(x, y 轴 1000 次, z 轴 2000 次)		

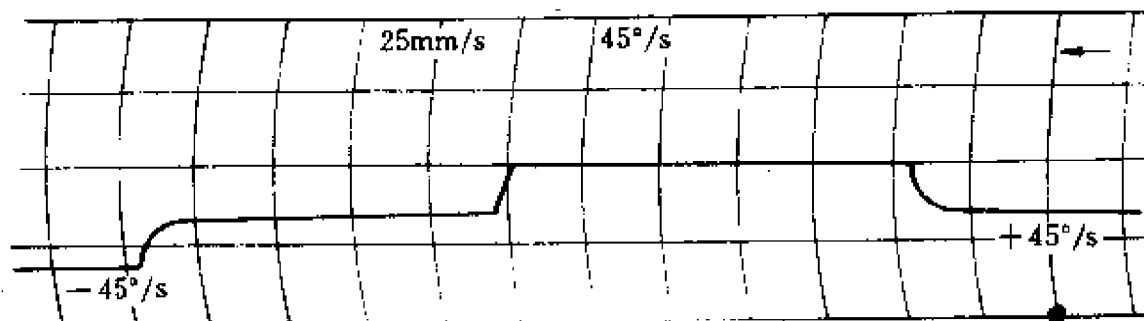


图 21.19 响应时间特性

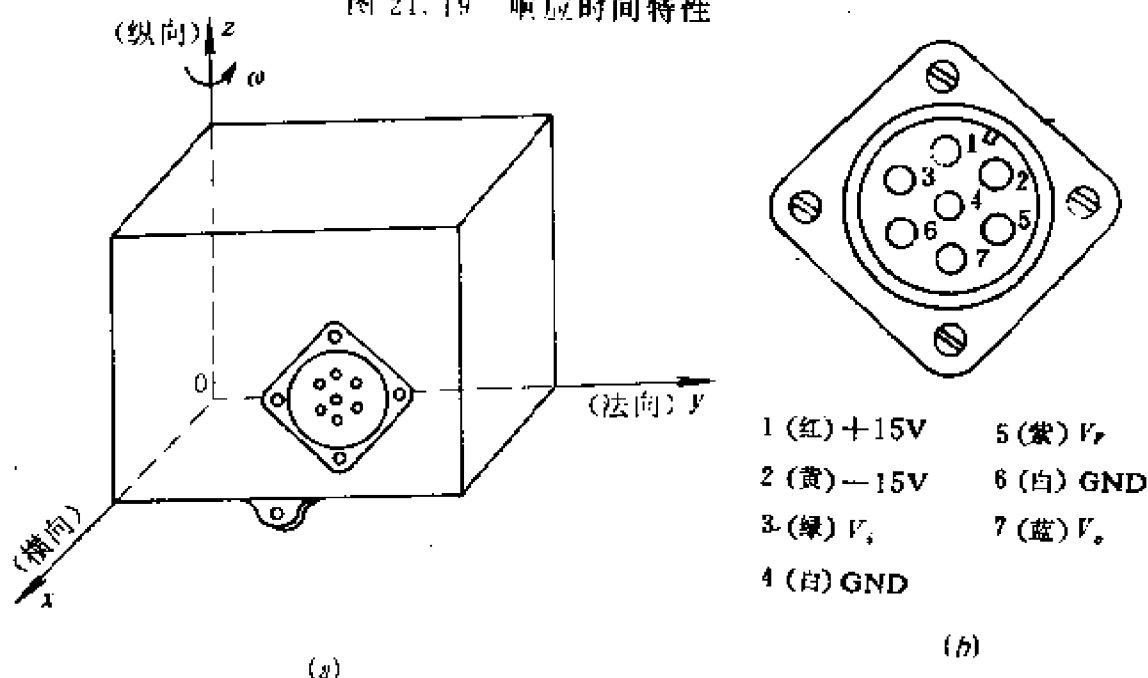


图 21.20 压电射流陀螺的敏感轴向和插座接点分配

表 21.4 PFR-106 型压电射流陀螺性能

动态范围( $^{\circ}/s$ )	$\pm 60$	准备时间(min)	$< 1$
线性度( $\%F$ )	$< 1$	响应时间(ms)	$< 80$
灵敏限( $^{\circ}/s$ )	$< 0.05$	工作温度( $^{\circ}C$ )	$-40 \sim +50$
分辨率( $^{\circ}/s$ )	$< 0.05$	零位输出(mV)	$\leq 10.0$
滞后( $^{\circ}/s$ )	$< 0.05$	比例系数(mV/ $^{\circ}/s$ )	$40 \pm 2$
MTBF(h)	$> 10000$	电源	$\pm 15VDC; 300mA$
交叉耦合	1.0%	重量(g)	420
体积(mm)	$72 \times 57 \times 50$		
振动灵敏度(mV)	10(20~70Hz, 1.5g, 3h)		
耐冲击(g)	40(x、y 轴 1000 次, z 轴 2000 次)		



### 21.8.3 可靠性

压电射流陀螺的 MTBF(平均无故障间隔)的设计值可达 250,000h。作者 1989 年 9 月 25 日至 1991 年 2 月 11 日先后将 13 套陀螺在实验室通电工作,13 套产品均未发生故障,累计工作 132912h。按时间截尾评定 MTBF 下限,即

$$MTBF_{(下限)} = \frac{2T}{\chi^2(\alpha, 2\gamma + 2)} \quad (21.23)$$

式中  $T$  是试验时间,  $\alpha$  是风险率,  $\gamma$  是故障数。在本试验中,  $T = 132912h$ ,  $\gamma = 0$ , 设  $\alpha = 0.1$ , 因此,

$$MTBF_{(下限)} = \frac{2 \times 132912h}{4.61} = 57662h \quad (21.24)$$

### 21.8.4 在汽车惯导系统中的应用

压电射流陀螺可用于图 21.21 所示的汽车惯性系统,图中 1 代表压电射流陀螺,2 代表积分器。积分后的速率信号,经过 A/D 变换器后用于汽车惯导系统。

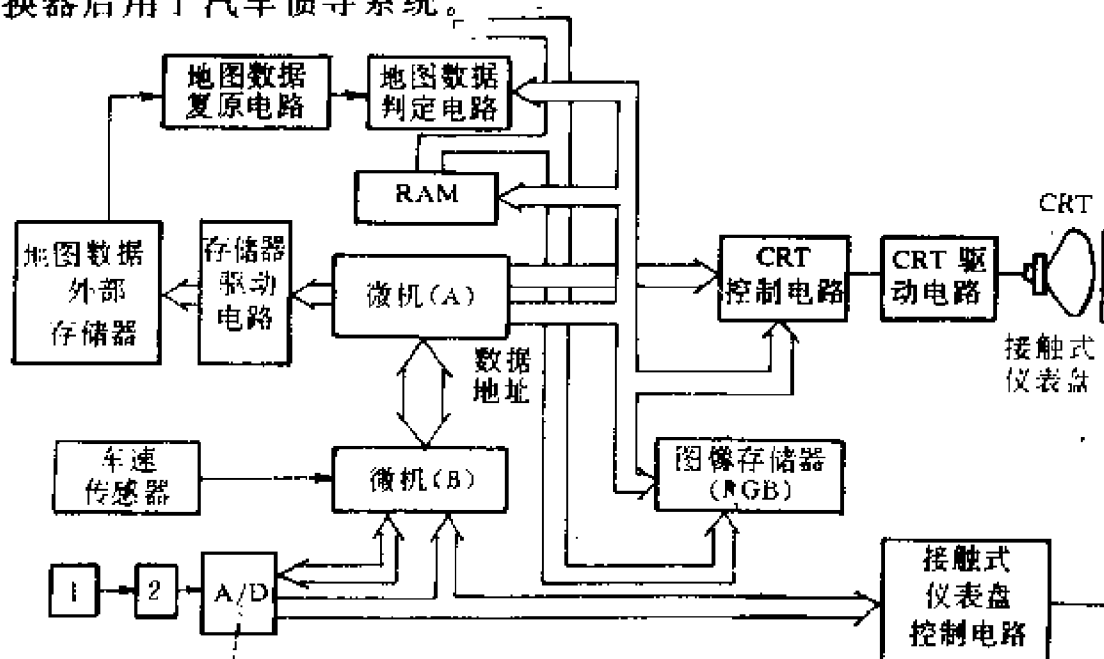


图 21.21 汽车惯导系统

### 21.8.5 在飞机和舰船中应用

压电射流陀螺可用于飞机和机器人的稳定系统与姿态参考系统、导弹和炮弹的滚控系统,以及坦克和舰船的增稳系统与自控系统。图 21.22 和图 21.23 分别示出使用压电射流陀螺遥测飞机上的相机平台系统和舰船的雷达稳定伺服系统。

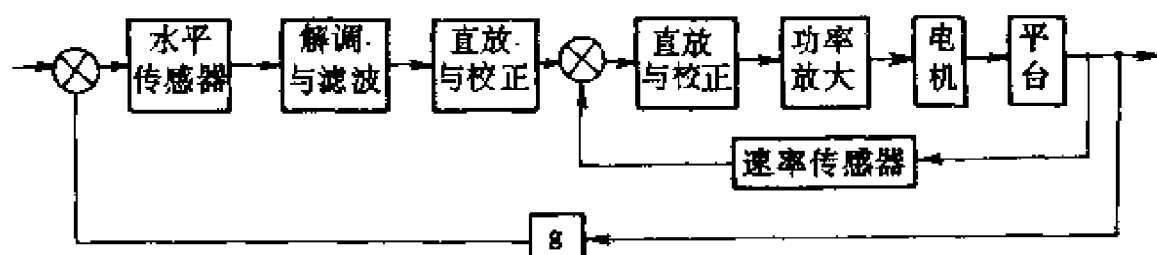


图 21.22 飞机上的相机平台系统

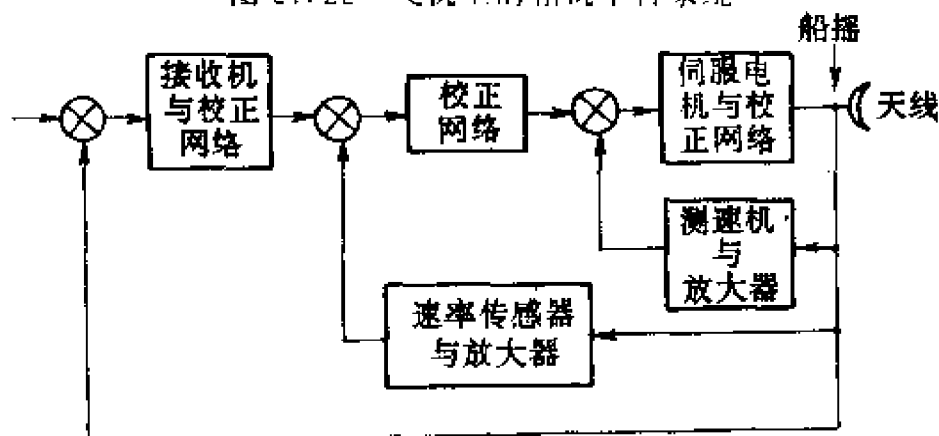


图 21.23 舰船的雷达稳定伺服系统

### 21.8.6 在智能机器人惯导系统中的应用

压电射流陀螺有耐振动、抗冲击、寿命长和成本低等特点,因此,它可用于智能机器人的惯导系统。

智能机器人的捷联惯导与 GP 定位系统如图 21.24 所示。捷联惯导系统由捷联惯性传感器(IMU)、导航计算机和基座组成。IMU 由三维压电射流陀螺、三维气体线性加速度传感器,以及安装框架和外罩组成。陀螺和加速度计都是三维的,能同时输出角速度、角位置、角加速度和线加速度。

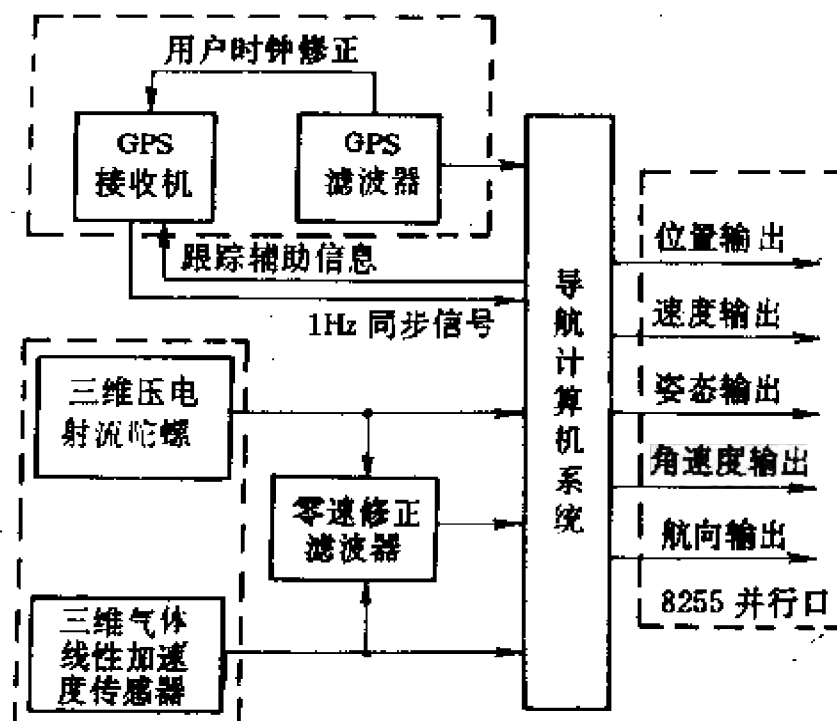


图 21.24 捷联惯导与 GP 定位系统

## 21.9 半球谐振式陀螺

### 21.9.1 工作原理

半球谐振陀螺是一种无活动部件的单轴速率积分陀螺。这种陀螺的工作原理是 1890 年英国科学家 G.H. 布瑞恩(Bryan)首先发现的谐振酒杯可敏感转动的特性。当敲打一转动的酒杯时,驻波将出现在谐振杯的边沿上。如图 21.25 所示,设驻波波腹轴  $A$  初始时与酒杯的某一参考轴  $R$  相对准。酒杯转过  $90^\circ$  时,轴  $A$  的转动角滞后  $30\%$  (即  $27^\circ$ ),如图 21.26 所示。滞后角与转动角之间比值  $K=0.3$  对谐振杯而言是一个物理常数。显然,只要检测出驻波相对于谐振杯的转角,即可知道陀螺的输出角度。图 21.26 中,若检测得驻波按某一方向转过  $27^\circ$ ,则表明谐振杯按反向转过  $90^\circ$ 。

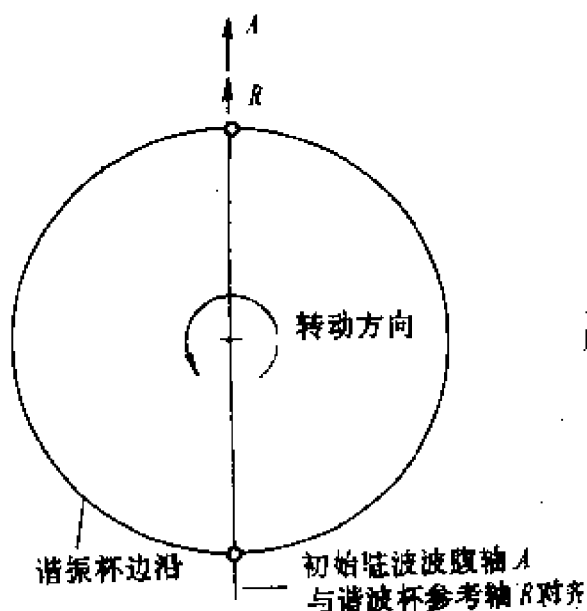


图 21.25 转动前的谐振酒杯

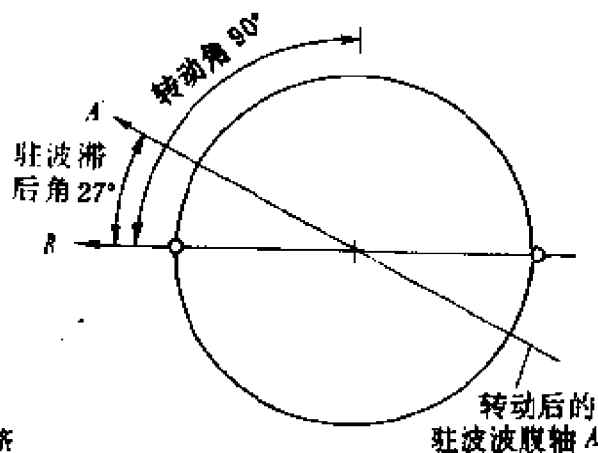


图 21.26 转动后的谐振酒杯

### 21.9.2 结构原理

利用上述 G. H. 布瑞恩原理研制的半球谐振陀螺的结构如图 21.27 所示,其由三个石英半球构成。谐振器镀铬电极,驱动器和敏感元件镀金电极。工作时,电信号加给驱动器,从而在驱动器和半球谐振器之间建立一个脉动的静电场,使半球谐振器按确定的频率振动。在驱动器室内表面上的 16 个静电驱动器的电极维持和控制振动幅度。传感器有 8 个电容性敏感元件,它们接近半球的内表面。陀螺绕谐振器的轴旋转时,振动模相对于陀螺壳体进动,敏感元件的电极检测这种进动,并将检测到的信号馈送到外接处理电路,从而得到一个角速度输出信号。

### 21.9.3 性能与应用

半球谐振陀螺和激光陀螺一样,亦有响应快、工作温度范围宽( $-50\sim 100^{\circ}\text{C}$ )和耐冲击(500g)等特点。此外,半球谐振陀螺的最大特点是,核爆炸导致瞬间中断电源时,它还能继续工作。因为中断电源后还有缓慢减幅振动,故传感器在中断电源期间(0.5h

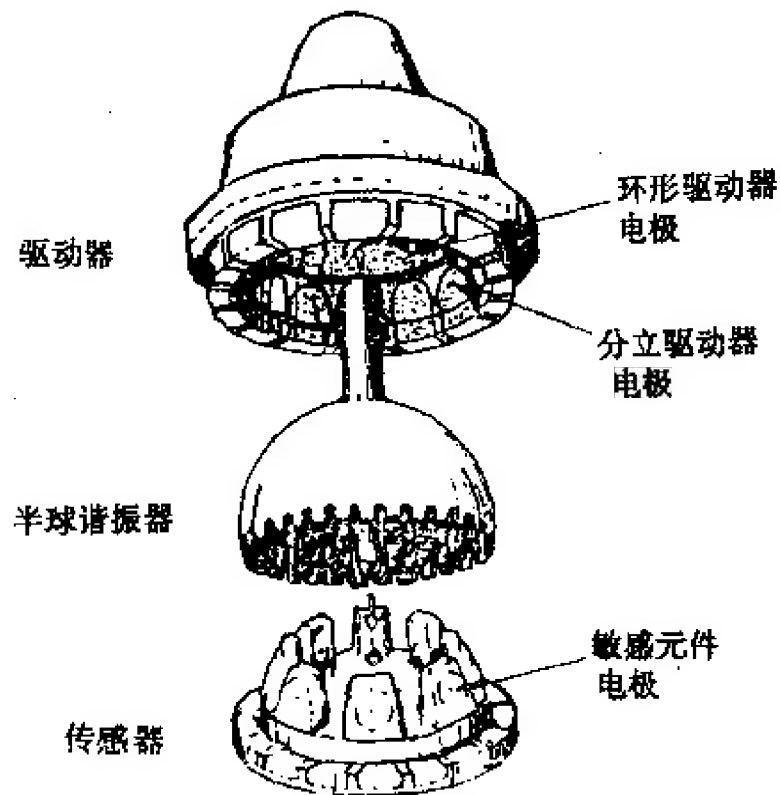


图 21.27 半球谐振陀螺的结构示意图

以内)还能继续工作。这种陀螺由于无轴承磨损,预计工作寿命可达 20 年以上。主要性能如下:

- |             |                                  |
|-------------|----------------------------------|
| (1) 体积      | $3.28 \times 10^{-5} \text{m}^3$ |
| (2) 重量      | $< 0.136 \text{kg}$              |
| (3) 量程      | $1000^\circ/\text{s}$            |
| (4) 零位稳定性   | $1^\circ/\text{h}$               |
| (5) 刻度因数稳定性 | $75 \text{ppm}$                  |
| (6) 起动时间    | 约几秒钟                             |
| (7) MTBF    | $> 50000 \text{h}$               |

半球谐振陀螺特别适合在捷联惯性导航系统中应用。例如,要求高精度导航的先进飞航式导弹和战斗机均可使用这种陀螺。

## 21.10 微机械振动陀螺

微机械振动陀螺用半导体工艺制作,其结构原理如图 21.28

所示。这种陀螺没有可动部件,是双框架结构,内框架安装垂直杆。内环可看作陀螺元件,外环可看作电机,每个环通过一组相互正交的挠性枢轴固定在另一环上。枢轴沿扭曲方向非常软,而在其他方向呈刚性。电极设置在内、外环上,若在硅芯片和电极之间加电压,即产生静电力。交变表面电极之间的电压,则会产生所要求的振动力矩。若外环在频率 $\omega$ 振动,转动一个角度 $\theta_y$ ,则内环敏感绕垂直于框架平面轴的角速度,通过测量电容的差分变化即可获得读出数据。

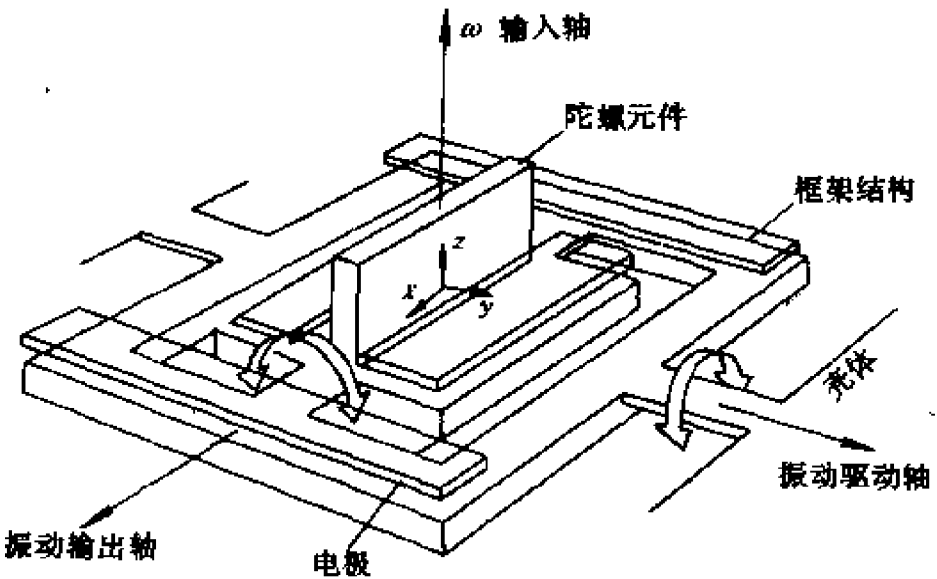


图 21.28 微机械振动式陀螺的结构原理图

微机械振动陀螺的出现将促进小型制导技术的发展。这种陀螺的性能如下:

内部谐振频率	2130Hz
外部谐振频率	2630Hz
输入速率	10.0rad/s
输出电压	0.88mV
零位电压	1.20mV

## 第二十二章 姿态传感器

### 22.1 惯性系统<sup>[29~33]</sup>

#### 22.1.1 基本概念

在一些实际应用中,通常需要测量载体的姿态信息,从而进行姿态控制和导航。实现导航及姿态测量的方案很多,但通常是非“自主式”的。所谓“自主”是指不依赖于载体外部信息,仅凭载体内部传感器测量出载体的姿态、位置(经纬度)和航向信息。惯性导航系统是利用惯性传感器的基准方向及最初的位置信息来确定载体的方位和速度的自主式的导航系统,它通过惯性传感器精确测量载体的旋转运动参量和直线运动加速度,经过积分得到速度、位置及姿态数据。惯性系统依赖载体内部传感器测量载体的运动参量,不与载体外界发生声、光、电、磁等联系,因而具有非常好的隐蔽性,不受外界气象条件、地理条件及人为因素的影响。惯性系统的这种特点使其不仅在强调隐蔽性的军事领域得以广泛应用,而且在某些难以接受外部信号的条件下,例如水下机器人、地下管道清洗机器人以及高层建筑的爬壁机器人等,有着良好的应用前景。

根据牛顿定律,载体相对惯性空间以加速度  $a$  运动时,用加速度计可测出作用在单位质量  $m$  上的惯性力  $ma$  和引力  $mg$  ( $g$  是引力加速度)的矢量和 ( $F$ ),即比力  $F$ ,用数学表达式为

$$F = a - g$$

载体上的加速度计测量出比力后,在已知载体初始位置和初始速度的情况下,通过积分即可以得到载体的位置信息。惯性系

统是一个自主的空间基准保持系统,主要由指示当地地垂线方向的分系统和保持惯性空间基准的分系统组成。载体处于静基座状态时,即载体仅作纵摇(俯仰)、横摇(横滚)运动时,可用加速度计指示当地地垂线方向。载体作角运动与线运动的复合运动时,由陀螺保持惯性空间基准。惯性系统可分为平台式和捷联式系统。

平台式系统的原理框图如图 22.1 所示,它有一个陀螺稳定平台,陀螺和加速度计安装在平台上,利用平台指示和保持惯性空间基准,以平台坐标系测量载体的运动参量。平台式系统又可以分成半解析式系统、几何式和解析式系统。

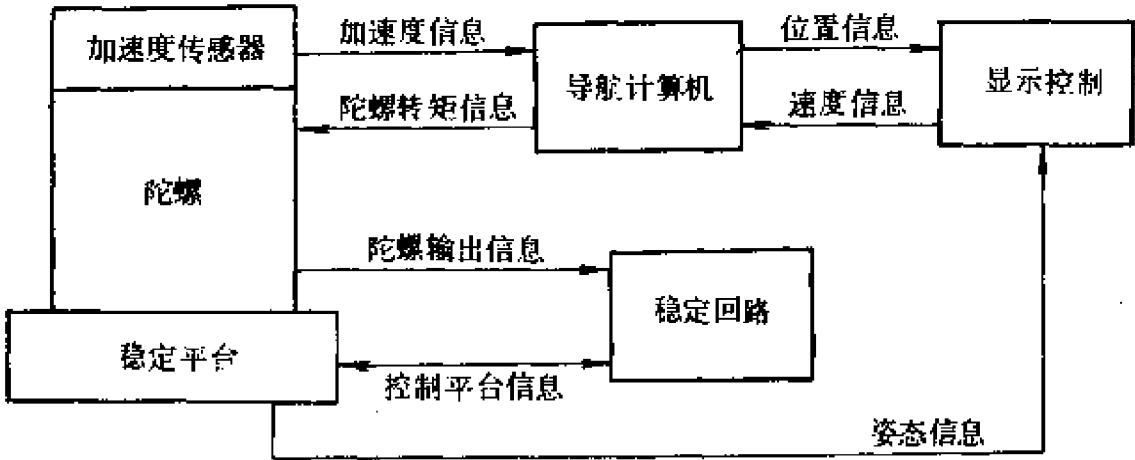


图 22.1 平台式系统的原理框图

捷联式系统原理框图如图 22.2 所示。捷联(strapdown)的英文原意是“捆绑”,在捷联式系统中没有陀螺稳定平台,惯性传感器(陀螺与加速度计)直接安装在载体上,以计算机实现的数学平台代替平台式系统中的物理平台。

捷联式惯性系统不具备平台式系统中的稳定平台,陀螺和加速度计分别沿载体坐标系直接固联在载体上,测量到的是载体坐标系轴向的运动参量。陀螺和加速度计的测量信息通过计算机进行实时计算,将载体坐标系的测量参量转换到参考坐标系的坐标系轴上。在这个过程中首先计算姿态变换矩阵,并通过计算姿态变换矩阵中的相关元素,求出载体的姿态角。因此,捷联式系统实际



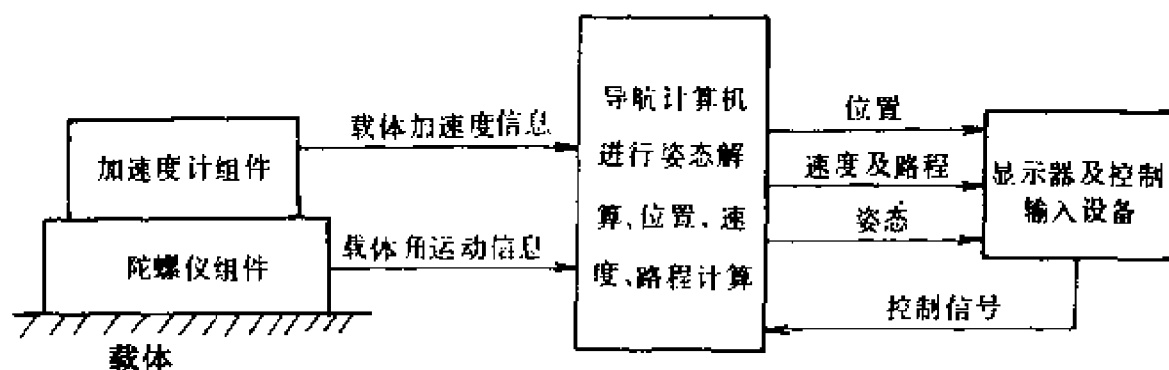


图 22.2 捷联式平台的原理框图

上是利用计算机来完成稳定平台功能,即用“数学平台”代替实际的物理平台,以计算机丰富的软件代替平台系统的硬件。与平台系统相比较,捷联式系统具有以下明显的优点:

- (1) 惯性传感器(陀螺和加速度计)易于安装、更换和维护;
- (2) 惯性传感器可以直接给出载体坐标系方向的运动角速度、线加速度和线速度信息;
- (3) 结构简单、造价低廉。

由于惯性传感器直接安装在载体上,没有平台系统隔离,故惯性传感器的工作环境恶化,对惯性传感器的性能要求高。另外,惯性传感器直接感受载体运动的冲击、振动,这样会引入动态误差,故系统中应有误差补偿措施。

## 22.1.2 坐标系定义

测量载体的运动参量应相对于一个固定不动的坐标系,但在宇宙中不存在绝对不动的坐标系(即惯性坐标系)。因此,在实际应用中选取一个相对不动的坐标系作为参考坐标,这样即可满足载体不同运动方式的测量。惯性技术领域常用的坐标系定义如下:

- (1)地心坐标系: $O_e X_e Y_e Z_e$ (记为*i*系)

地心坐标系定义:地心作为坐标原点 $O_e$ ,以 $O_e$ 为原点作右手坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ , $O_e Z_e$ 轴沿地轴指向地球的北极。 $O_e X_e$ , $O_e Y_e$ 在地球的赤道平面内与 $O_e Z_e$ 轴垂直并不随地球自转。 $O_e X_e$ , $O_e Y_e$ , $O_e Z_e$

均指向惯性空间的某一方向不变。

(2) 地球坐标系:  $O_e X_e Y_e Z_e$

地球坐标系的原点位于地心, 与地球固联, 是  $O_e Z_e$  轴与极轴重合的右手直角坐标系。 $O_e X_e$ 、 $O_e Y_e$  轴在赤道平面内,  $O_e X_e$  轴指向格林尼治经线,  $O_e Y_e$  轴指向东经  $90^\circ$  方向。地球坐标系随地球以角速度  $\omega_e = 15.041088^\circ/\text{h}$  自转。

(3) 地理坐标系:  $O X_i Y_i Z_i$

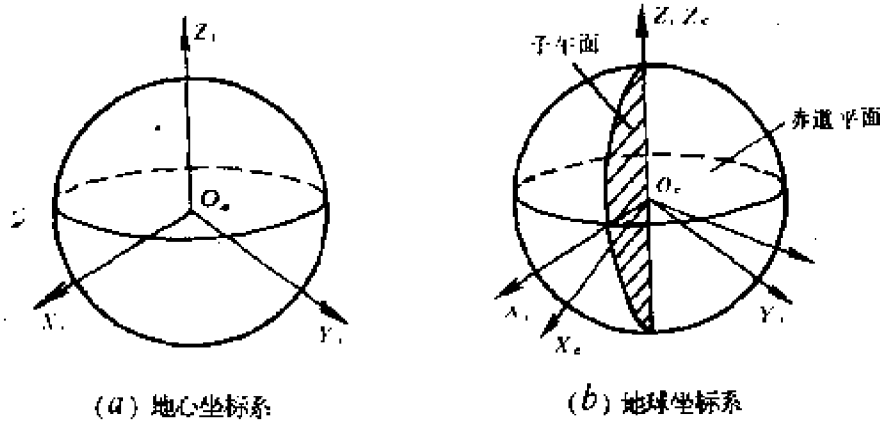


图 22.3 地心坐标系、地球坐标系和地理坐标系示意图

地理坐标系即所谓的“东北天”坐标系, 是指原点位于载体所在的地球表面,  $OZ_i$  轴与地理垂线重合的右手直角坐标系。 $OX_i$  指向东,  $OY_i$  指向北,  $OZ_i$  轴指天,  $OZ_i$  轴与赤道平面的夹角即为当地纬度。地理坐标系相对地球坐标系或地心坐标系是一个动坐标系, 当载体在地球表面运动时, 地理坐标的方向在不断变化。地心坐标系、地球坐标系和地理坐标系如图 22.3 中的 (a) (b) (c) 所示。

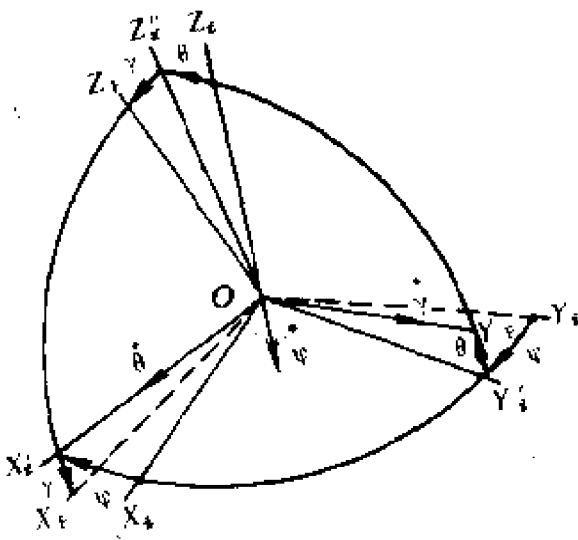


图 22.4 载体坐标系与地理坐标系的相对关系

#### (4) 载体坐标系: $OX_F Y_F Z_F$

载体在地球表面运动时,会出现偏航、纵摇(俯仰)和横摇(横滚)。确定载体相对于地理坐标系的角位置,需要有一个与载体固联的坐标系,即载体坐标系。一般载体坐标系定义:坐标原点  $O$  位于载体重心,  $OY_F$  轴沿载体纵轴向前,  $OX_F$  轴与  $OY_F$  轴垂直向右的右手直角坐标系。载体坐标系相对于地理坐标系所处的状态用姿态角表示。所谓姿态角即载体纵摇(俯仰)角  $\theta$ 、横摇(横滚)角  $\gamma$  和方位角  $\psi$ 。 $\theta$ 、 $\gamma$  分别为  $OY_F$ 、 $OX_F$  与水平面之间的夹角。方位角  $\psi$  为当  $OX_F$ 、 $OY_F$  处于水平面时,  $OY_F$  与  $OY_i$  之间的夹角。 $\theta$ 、 $\gamma$ 、 $\psi$  均以顺时针方向为正,已知  $\theta$ 、 $\gamma$ 、 $\psi$ ,即可确定载体相对当地地理坐标系的角位置。载体坐标系与地理坐标系的相对关系如图 22.4 所示。

## 22.2 捷联式系统的基本方程

### 22.2.1 位置方程

地球坐标系  $O_e X_e Y_e Z_e$  到地理坐标系  $OX_i Y_i Z_i$  的转换如图 22.5 所示,按以下顺序转换

$$O_e X_e Y_e Z_e \xrightarrow[\lambda]{\text{绕 } Z_e \text{ 轴}} O_e X_e' Y_e' Z_e' \xrightarrow[90^\circ - \varphi]{\text{绕 } Y_e' \text{ 轴}} O_e X_e'' Y_e'' Z_e'' \xrightarrow[90^\circ]{\text{绕 } Z_e'' \text{ 轴}} OX_i Y_i Z_i$$

以上转换关系可用如下矩阵表示

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = C_e \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} \quad (22.1)$$

式中  $\lambda$  是经度值,取值范围  $-180^\circ \sim 180^\circ$ ;  $\varphi$  是纬度值,取值范围是  $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。若令

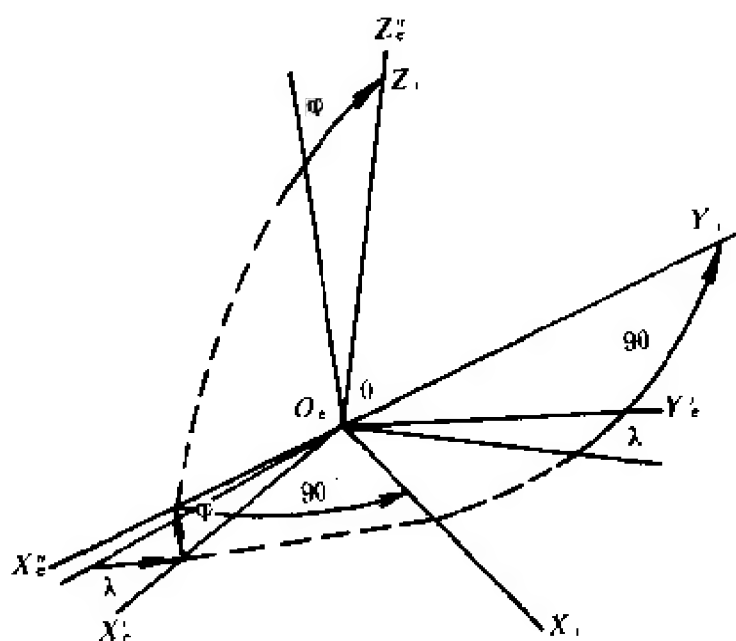


图 22.5 地球坐标系转换到地理坐标系的示意图

$$C_e^i = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

则

$$\varphi_{\pm} = \sin^{-1} C_{33}$$

$$\lambda_{\pm} = \text{tg}^{-1}(C_{32}/C_{31})$$

真值的确定依据:  $\varphi_{\text{真}} = \varphi_{\pm}$

$$\lambda_{\text{真}} = \begin{cases} \lambda_{\pm} & C_{31} > 0 \\ \lambda_{\pm} + 2\pi & C_{31} < 0 \text{ 且 } \lambda_{\pm} < 0 \\ \lambda_{\pm} - 2\pi & C_{31} < 0 \text{ 且 } \lambda_{\pm} > 0 \end{cases}$$

实际上,载体在地球表面运动会引起地理坐标系相对地球坐标系运动,因此,经纬度的数值在不断变化。对  $C_e^i$  求导得到微分方程

$$\dot{C}_e^i = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{eiz}^i & \omega_{eiy}^i \\ \omega_{eiz}^i & 0 & -\omega_{eix}^i \\ -\omega_{eiy}^i & \omega_{eix}^i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (22.2)$$

式中,  $\omega_{ex}^i, \omega_{ey}^i, \omega_{ez}^i$  分别为地理坐标系相对地球坐标系运动角速度在地理坐标系  $X, Y, Z$  轴上的分量, 显然  $\omega_{ez}^i = 0$ 。因此, 有如下微分方程组

$$\begin{aligned}\dot{C}_{11} &= \omega_{ey}^i C_{31} \\ \dot{C}_{12} &= \omega_{ey}^i C_{32} \\ \dot{C}_{13} &= \omega_{ey}^i C_{33} \\ \dot{C}_{21} &= -\omega_{ex}^i C_{31} \\ \dot{C}_{22} &= -\omega_{ex}^i C_{32} \\ \dot{C}_{23} &= -\omega_{ex}^i C_{33} \\ \dot{C}_{31} &= -\omega_{ey}^i C_{11} + \omega_{ex}^i C_{21} \\ \dot{C}_{32} &= -\omega_{ey}^i C_{12} + \omega_{ex}^i C_{22} \\ \dot{C}_{33} &= -\omega_{ey}^i C_{13} + \omega_{ex}^i C_{23}\end{aligned}\quad (22.3)$$

求解微分方程组可以得到  $C_i$  中的各个元素, 从而求出  $\varphi, \lambda$ 。

### 22.2.2 姿态速率方程

捷联式系统的陀螺测量沿载体坐标系方向上的角速率  $\omega_{FX}, \omega_{FY}, \omega_{FZ}$ , 由于载体运动时地理坐标系随之运动, 故实际测到的角速度是地球自转角速度、地理坐标系运动角速度与载体运动角速度之和, 即

$$\overline{\omega}_F = \overline{\omega}_{if}^F + \overline{\omega}_n^F + \overline{\omega}_e^F \quad (22.4)$$

式中  $\overline{\omega}_e^F$  是地球自转角速度,  $\overline{\omega}_n^F$  是地理坐标系运动角速度, 其中

$$\omega_e^i = C_i^T \omega_e^F = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_e C_{13} \\ \Omega_e C_{23} \\ \Omega_e C_{33} \end{bmatrix} \quad (22.5)$$

$\Omega_e$  是地球自转角速度,  $\Omega_e = 15^\circ/h$ 。因此, 载体的运动角速度

$$\overline{\omega}_{if}^F = \overline{\omega}_F - \overline{\omega}_n^F - \overline{\omega}_e^F \quad (22.6)$$

即

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \omega_{iFx}^f \\ \omega_{iFy}^f \\ \omega_{iFz}^f \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \omega_{Fx} \\ \omega_{Fy} \\ \omega_{Fz} \end{bmatrix} - C_i^F \begin{bmatrix} \omega_{ex}^i + \Omega_e C_{13} \\ \omega_{ey}^i + \Omega_e C_{23} \\ \omega_{ez}^i + \Omega_e C_{33} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \omega_{Fx} \\ \omega_{Fy} \\ \omega_{Fz} \end{bmatrix} - C_i^F \begin{bmatrix} -V_y^i/R_N \\ V_x^i/R_M + \Omega_e C_{23} \\ V_x^i/R_M + \Omega_e C_{33} \end{bmatrix} \quad (22.7)
\end{aligned}$$

式中,  $C_i^F$  是地理坐标系到载体坐标系的转换矩阵,

$$R_N = R_e(1 - 2e + 3e\sin^2\varphi),$$

$$R_M = R_e(1 + e\sin^2\varphi),$$

$$e = \frac{R_e - R_p}{R_e}$$

$R_e$  是赤道半径,  $R_p$  是极轴半径,  $V_x^i, V_y^i$  分别是载体沿地理坐标系  $X$  轴和  $Y$  轴的线速度。

### 22.2.3 姿态方程

地理坐标系到载体坐标系的转换如图 22.6 所示, 过程如下

$$OX_iY_iZ_i \xrightarrow[\psi]{\text{绕 } OZ_i \text{ 轴}} OX_i'Y_i'Z_i' \xrightarrow[\theta]{\text{绕 } OX_i' \text{ 轴}} OX_i''Y_i''Z_i'' \xrightarrow[\gamma]{\text{绕 } OY_i'' \text{ 轴}} OX_FY_FZ_F$$

其中,  $\psi$  是航向角, 以顺时针方向计量, 范围  $0 \sim 360^\circ$ ;  $\theta$  是俯仰角, 范围  $\pm 90^\circ$ ;  $\gamma$  是横摇角, 范围  $\pm 90^\circ$ 。

地理坐标系到载体坐标系的变换矩阵如下

$$C_i^F = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\gamma + \sin\psi\sin\theta\sin\gamma & \cos\psi\sin\theta\sin\gamma - \sin\psi\cos\gamma & -\cos\theta\sin\gamma \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\theta\cos\psi & \sin\theta \\ \cos\psi\sin\gamma - \sin\psi\sin\theta\cos\gamma & -\sin\psi\cos\gamma - \cos\psi\sin\theta\cos\gamma & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \quad (22.8)$$

因此, 从  $i$  系到  $F$  系的变换为

$$\begin{bmatrix} X_F \\ Y_F \\ Z_F \end{bmatrix} = C_i^F \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (22.9)$$

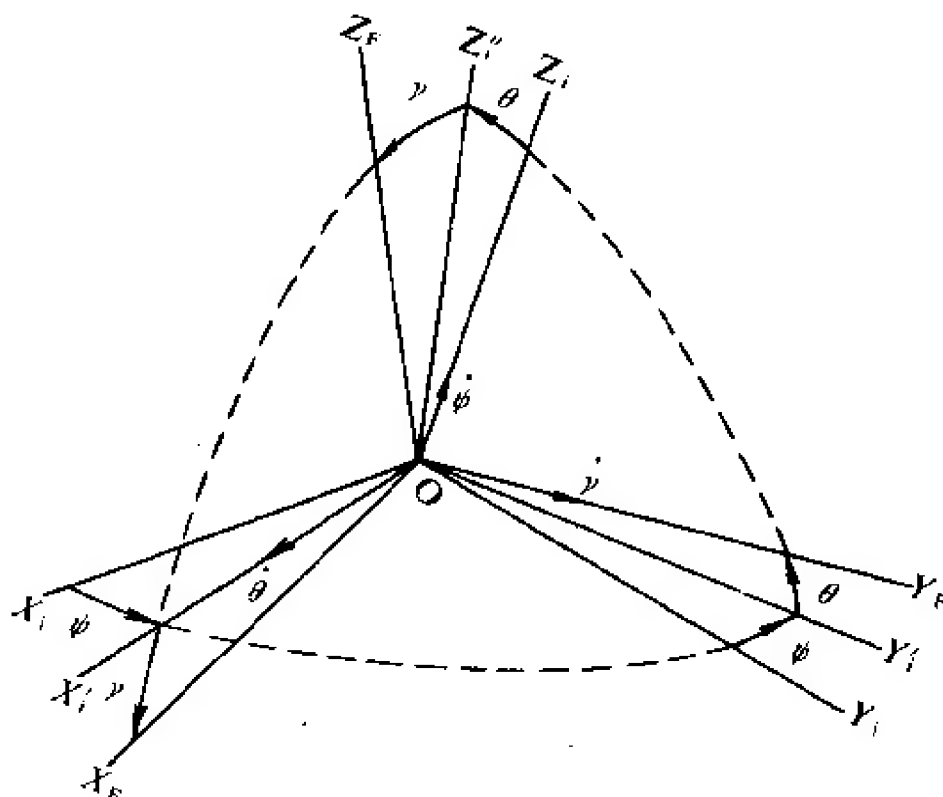


图 22.6 地理坐标系到载体坐标系转换的示意图

因为  $C_i^F$  是正交矩阵,  $(C_i^F)^T = (C_i^F)^{-1}$ , 故反变换矩阵为

$$\begin{aligned}
 C_F^i = (T_{ij}) &= \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\gamma + \sin\psi\sin\theta\sin\gamma & \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\gamma - \sin\psi\sin\theta\cos\gamma \\ \cos\psi\sin\theta\sin\gamma - \sin\psi\cos\gamma & \cos\theta\cos\psi & -\sin\psi\sin\gamma - \cos\psi\sin\theta\cos\gamma \\ -\cos\theta\sin\gamma & \sin\theta & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} = T \quad (22.10)
 \end{aligned}$$

由矩阵  $T$  中元素可以得到姿态角  $\theta, \gamma, \psi$ , 即

$$\theta_{\pm} = \sin^{-1}(T_{32})$$

$$\gamma_{\pm} = \text{tg}^{-1}(-T_{31}/T_{33})$$

$$\psi_{\pm} = \text{tg}^{-1}(T_{12}/T_{22})$$

真值:  $\theta_{\text{真}} = \theta_{\pm}, \gamma_{\text{真}} = \gamma_{\pm}$

$$\phi_{\pm} = \begin{cases} \phi_{\pm}, & T_{22} > 0 \\ \phi_{\pm} + 2\pi, T_{22} < 0 \text{ 且 } \phi_{\pm} < 0 \\ \phi_{\pm} - 2\pi, T_{22} < 0 \text{ 且 } \phi_{\pm} > 0 \end{cases}$$

对矩阵  $T$  求导可得姿态的微分方程

$$\dot{T} = \begin{bmatrix} \dot{T}_{11} & \dot{T}_{12} & \dot{T}_{13} \\ \dot{T}_{21} & \dot{T}_{22} & \dot{T}_{23} \\ \dot{T}_{31} & \dot{T}_{32} & \dot{T}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{iFz} & \omega_{iFy} \\ \omega_{iFz} & 0 & -\omega_{iFx} \\ -\omega_{iFy} & \omega_{iFx} & 0 \end{bmatrix} \quad (22.11)$$

故可得到九个微分方程组

$$\begin{aligned} \dot{T}_{11} &= T_{12}\omega_{iFz} - T_{13}\omega_{iFy} \\ \dot{T}_{12} &= -T_{11}\omega_{iFx} + T_{13}\omega_{iFx} \\ \dot{T}_{13} &= T_{11}\omega_{iFy} - T_{12}\omega_{iFx} \\ \dot{T}_{21} &= T_{22}\omega_{iFz} - T_{23}\omega_{iFy} \\ \dot{T}_{22} &= -T_{21}\omega_{iFx} + T_{23}\omega_{iFx} \\ \dot{T}_{23} &= T_{21}\omega_{iFy} - T_{22}\omega_{iFx} \\ \dot{T}_{31} &= T_{32}\omega_{iFz} - T_{33}\omega_{iFy} \\ \dot{T}_{32} &= -T_{31}\omega_{iFx} + T_{33}\omega_{iFx} \\ \dot{T}_{33} &= T_{31}\omega_{iFy} - T_{32}\omega_{iFx} \end{aligned} \quad (22.12)$$

求解上述联立微分方程,给出  $T$  矩阵的每个参数,即可求得  $\theta$ 、 $\gamma$ 、 $\psi$ 。

## 22.3 机器人姿态传感器

### 22.3.1 机器人姿态传感器的特点

由前面对捷联式系统基本方程的分析可以看出,求解姿态方程必须首先根据位置信息(经度与纬度)计算出地球自转角速度及地理坐标系运动角速度在载体坐标系中的分量,这样才能获取载体本身运动的角速度信息。同时,还要实时修正载体的位置方程,



求解姿态微分方程。解九个微分方程组的运算量大,一般采用四元素法求解微分方程。

四元素是一个实系数的四元素组,它是一个四维空间中的矢量,一般表示为

$$Q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k$$

用四元素描述刚体定点转动时四元素的矢量部分可看作三维空间的一个矢量,载体相对地理坐标系的位置可用四元素表示。姿态矩阵可写为

$$C_r^f = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (22.13)$$

其微分方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ifx} & -\omega_{ify} & -\omega_{ifz} \\ \omega_{ifx} & 0 & \omega_{ifz} & \omega_{ify} \\ \omega_{ify} & -\omega_{ifx} & 0 & \omega_{ifz} \\ \omega_{ifz} & \omega_{ify} & -\omega_{ifx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (22.14)$$

该方程的解满足约束条件

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$$

求解四元素微分方程组的数值解可以得到  $T$  矩阵的九个元素。初始值由下式给出

$$\begin{aligned} |q_0| &= 1 + T_{11}(0) + T_{22}(0) + T_{33}(0)/2 \\ |q_1| &= 1 + T_{11}(0) - T_{22}(0) - T_{33}(0)/2 \\ |q_2| &= 1 - T_{11}(0) + T_{22}(0) - T_{33}(0)/2 \\ |q_3| &= 1 - T_{11}(0) - T_{22}(0) + T_{33}(0)/2 \end{aligned} \quad (22.15)$$

由四元素法求解姿态矩阵  $T$  虽能使运算量明显减少,但要解算出多种信息就必须提高计算机和外围芯片的运算速度。

捷联式系统的应用中,由于载体的机动性较大,故要求陀螺的测量范围由  $0.01^\circ/\text{h}$  到  $400^\circ/\text{s}$ , 且动态误差小。对加速度计的要

求,一般为  $10^{-4} \sim 10^{-5}g$ 。这样的捷联式系统既能自主地提供姿态信息,还可自寻北,即可提供精确的航向信息、位置信息、速度信息,从而实现导航与定位、定向。尽管捷联式导航系统相对平台式导航系统的造价已大幅度下降,但由于其对惯性元件及计算机的要求较高,故成本仍非常高。另外,捷联式导航系统对惯性传感器的测量范围、抗振动、耐冲击等有较苛刻的要求,故捷联式惯导系统应用于车辆式机器人要克服许多困难。

实际上,很多行走式或车辆式机器人的运动范围很小,有的甚至在方圆百米内行动,一般运动速度都不高,最高时速  $20 \sim 60\text{km/h}$ 。这种机器人的连续工作时间短,不需要提供位置信息和精确的姿态信息,有些场合甚至允许  $1^\circ \sim 2^\circ$  的姿态角误差,但要求姿态传感器能在非常恶劣的条件下正常工作。鉴于这种情况,北京信息工程学院于 1991 年下半年开始用气流式惯性传感器组成捷联式姿态传感器的研究工作。气流式惯性传感器的成本低,特别是它具有其他惯性器件不可相媲美的抗恶劣环境性能,承受高达  $16000g$  的冲击后还能正常。

### 22.3.2 捷联系统基本方程的简化

地球赤道平面的半径约为  $6378\text{km}$ ,在地球表面运动的载体,其运行高度可以忽略不计。假设地球是一个以  $R_e = 6378\text{km}$  为半径的球,则北京地区的经纬度分别约  $116^\circ$  和  $40^\circ$ 。载体以经度  $116^\circ$  纬度  $40^\circ$  为原点,在方圆  $1\text{km}$  内运动,运动轨道最大直径为  $2\text{km}$ ,则最大直径引起的纬度变化约  $1'$ ,经度变化约

$$2/R_e \cos 40^\circ \times 57.3 \times 60 = 1.4'$$

假设载体坐标系与地理坐标系重合,载体沿  $40^\circ$  纬度线向北以  $60\text{km/h}$  运动,则投影在载体坐标系上的  $\omega_{ex}^f$  最大。此时

$$\omega_{ex}^f = \frac{-V_y'}{R_N} = \frac{-60}{3600} \times \frac{1}{6378(1 - 2e + 3e^2 \sin^2 40^\circ)}$$

$$e = \frac{R_p - R_e}{R_e} = \frac{6378 - 6356}{6378} = 0.00345$$

因此,  $\omega_{ax}^F = -0.00000261 \text{ rad/s} = 0.00015^\circ/\text{s}$ 。

同样, 假设地理坐标系与载体坐标系重合, 载体以  $60\text{km/h}$  的速度向西行驶, 则

$$\omega_{ay}^F = -\frac{V_x}{R_m} = \frac{-60}{3600} \times \frac{1}{R_e(1 + e\sin^2\varphi)} = 0.00000261 \text{ rad/s}$$

此时投影到载体  $Y$  轴的角速度值也为最大。

以上分析均建立在载体坐标系与地理坐标系重合的情况下, 故分析得到的数据均为极限值。在实际情况下, 由于载体坐标系相对地理坐标系有转动, 因此实际测量到的  $\omega_{ax}^F$ 、 $\omega_{ay}^F$  均小于上述极限值。

从以上分析可以看出, 载体以较慢的运行速度在很小的运动范围内运动时, 可认为地理坐标系相对地球坐标系是固定的。这种假设的纬度误差约  $1'$ , 经度误差约  $2'$ , 故这个误差是可以容许的, 地理坐标系相对于地球坐标系的运动速度可以忽略不计。显然, 由于假设载体的位置基本不变,  $\Phi$ 、 $\lambda$  值是固定的, 因此不需要解位置微分方程, 只是在进行运算给定好初始值时必须知道载体所处的纬度数值。在姿态速率方程中,

$$\begin{aligned}\omega_F &= \omega_{iF} + \omega_{ai}^F + \omega_e^F \\ &= \begin{bmatrix} \omega_X^F \\ \omega_Y^F \\ \omega_Z^F \end{bmatrix} - C_i^F \begin{bmatrix} 0 \\ \Omega_e C_{23} \\ \Omega_e C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_X^F \\ \omega_Y^F \\ \omega_Z^F \end{bmatrix} - C_i^F \begin{bmatrix} 0 \\ \Omega_e \cos\psi \\ \Omega_e \sin\psi \end{bmatrix} \quad (22.16)\end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned}\omega_{iFx}^F &= \omega_X^F - T_{21}\Omega_e \cos\psi - T_{31}\Omega_e \sin\psi \\ \omega_{iFy}^F &= \omega_Y^F - T_{22}\Omega_e \cos\psi - T_{32}\Omega_e \sin\psi \\ \omega_{iFz}^F &= \omega_Z^F - T_{23}\Omega_e \cos\psi - T_{33}\Omega_e \sin\psi\end{aligned} \quad (22.17)$$

由姿态微分方程得到

$$\begin{aligned}T_{12} &= -T_{11}\omega_{iFx}^F + T_{13}\omega_{iFz}^F \\ T_{22} &= -T_{21}\omega_{iFx}^F + T_{23}\omega_{iFz}^F\end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned} T_{12} &= (\sin\phi\cos\theta)' = +\dot{\phi}\cos\phi\cos\theta - \dot{\theta}\sin\phi\sin\theta \\ T_{22} &= (\cos\theta\cos\phi)' = -\dot{\phi}\sin\phi\cos\theta - \dot{\theta}\cos\phi\sin\theta \end{aligned} \quad (22.18)$$

因此,

$$+\dot{\phi}\cos\phi\cos\theta - \dot{\theta}\sin\phi\sin\theta = -T_{11}\omega_{iFz}^F + T_{13}\omega_{iFx}^F \quad (22.19a)$$

$$-\dot{\phi}\sin\phi\cos\theta - \dot{\theta}\cos\phi\sin\theta = -T_{21}\omega_{iFz}^F + T_{23}\omega_{iFx}^F \quad (22.19b)$$

$$\begin{aligned} \text{式 (22.19a)} \times \cos\phi - \text{式 (22.19b)} \times \sin\phi &= \dot{\phi}\cos\theta \\ &= \omega_{iFz}^F(-T_{11}\cos\phi + T_{21}\sin\phi) + \omega_{iFx}^F(T_{13}\cos\phi - T_{23}\sin\phi) \end{aligned} \quad (22.20)$$

两边同乘  $\cos\theta$ , 并代入  $T_{11}, T_{21}, T_{13}, T_{23}$  的表达式, 则可得

$$\dot{\phi}\cos^2\theta = -T_{31}\omega_{iFz}^F + T_{33}\omega_{iFx}^F \quad (22.21)$$

因此,

$$\dot{\phi} = \frac{1}{1 - T_{32}^2}(-T_{31}\omega_{iFz}^F + T_{33}\omega_{iFx}^F) \quad (22.22)$$

所以, 只要求解四个微分方程:

$$\begin{cases} \dot{T}_{31} = T_{32}\omega_{iFz}^F - T_{33}\omega_{iFy}^F \\ \dot{T}_{32} = -T_{31}\omega_{iFz}^F + T_{33}\omega_{iFx}^F \\ \dot{T}_{33} = T_{31}\omega_{iFy}^F - T_{32}\omega_{iFx}^F \\ \dot{\phi} = \frac{1}{1 - T_{32}^2}(-T_{31}\omega_{iFz}^F - T_{33}\omega_{iFz}^F) \end{cases} \quad (22.23)$$

再由

$$\begin{aligned} \theta &= \sin^{-1}(T_{32}) \\ \gamma &= \tan^{-1} \frac{-T_{31}}{T_{33}} \end{aligned} \quad (22.24)$$

即可求出  $\theta, \gamma, \phi$ 。

### 22.3.3 姿态传感器对陀螺、加速度计的性能要求

为了验证以上分析的结果并推算造成的误差, 需要进行计算机仿真。在仿真中选定一种极限情况, 即载体以某恒定速度绕固定点做匀速圆周运动。如图 22.7 所示, 载体以恒速 20km/h 绕一定

点 P 以半径 1km 做匀速圆周运动。A 点的经度为  $110^\circ$ ，纬度为  $45^\circ$ 。选择迭代周期  $\Delta T = 0.05 \text{ s}$ 。

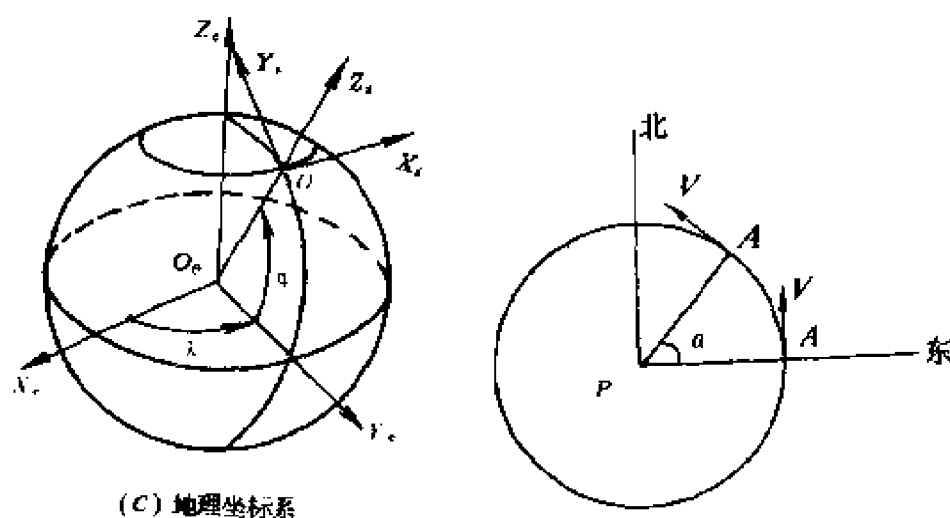


图 22.7 载体匀速圆周运动示意图

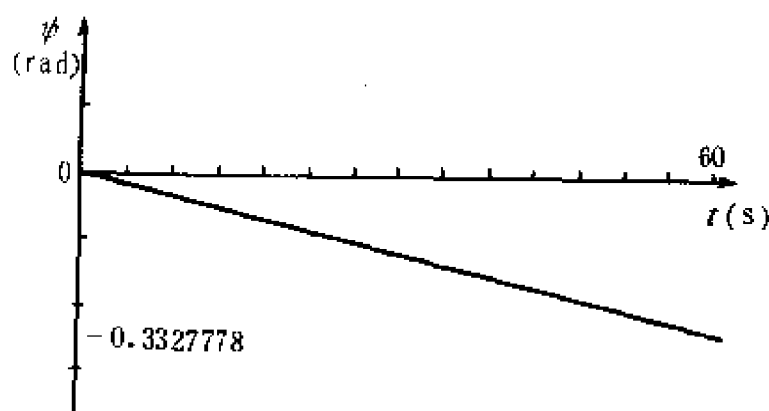


图 22.8 算法一计算的载体运动 60s 内航向角运动趋势

#### 仿真一

假设载体无俯仰和横摇运动，载体坐标系的  $X$  轴和  $Y$  轴与地理坐标系重合。即  $\theta(0) = 0, \gamma(0) = 0$ ，且  $\omega_x^f = 0, \omega_y^f = 0$ 。载体绕定点作匀速圆周运动， $\omega_z^f = V/R = 0.0055 \text{ rad/s}$ 。仿真程序分别采用未简化的姿态方程组（称算法一）与简化的姿态方程组（称算法二）进行航向角计算。图 22.8 为由算法一计算的载体运动 60s 内的航向角运动趋势，图 22.9 为运行 240s 内（约全程的 1/4）实际的航向角与由算法一计算的航向角之差（算法一误差），图 22.10 所示为由

算法二计算的 60s 内的航向角运动趋势,图 22.11 为 240s 内的实际值与算法二计算的航向角的差(算法二误差)。

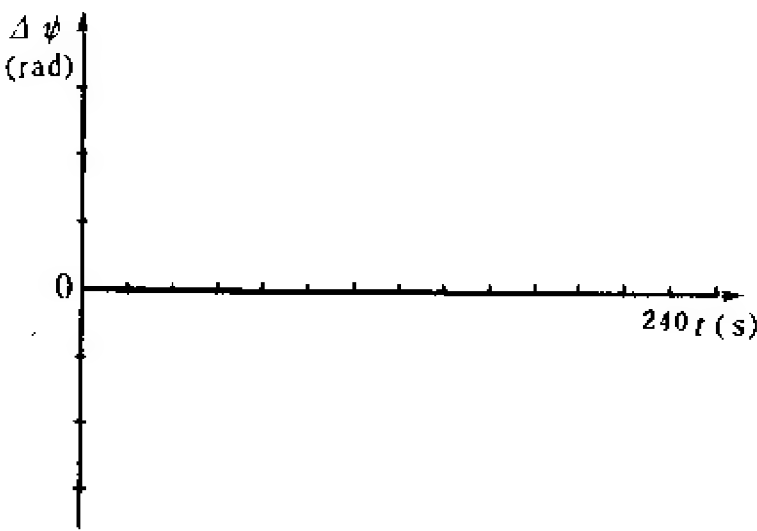


图 22.9 运行 240s 内,实际航向角与由算法一计算的航向角之差

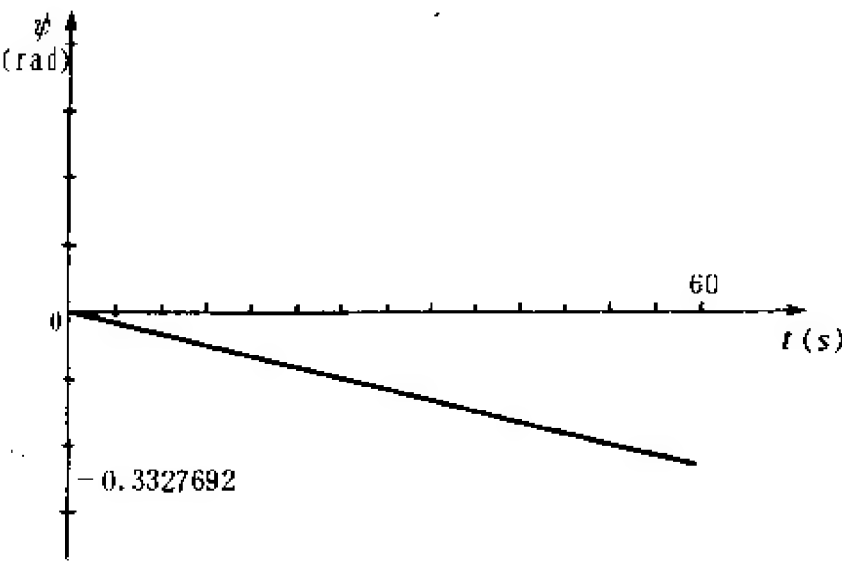


图 22.10 算法二计算的 60s 内航向角运动趋势

由上图可以看出,由算法一计算的航向角与实际航向角之间的误差为 0,较长时间计算,计算中的舍入误差会造成一定的计算误差,但这个误差的量值在  $10^{-10}$ rad 以下,可以忽略。因此,算法一的计算精度非常高,但是,这种算法的计算工作量较大,且对陀螺和加速度计的要求也较高。

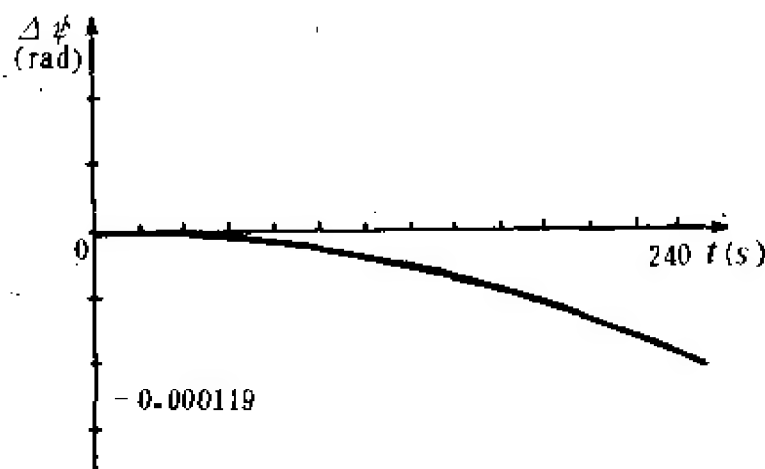


图 22.11 240s 内航向角实际值与算法二计算的航向角之差

算法二中忽略了地理坐标系相对地球坐标系的运动,故计算结果有误差,但在 240s 时误差为  $1.19 \times 10^{-4} \text{rad}$ ,约  $6.8 \times 10^{-3}$  度,可以忽略不计。

### 仿真二

载体以恒速 20km/h 绕 P 做匀速圆周运动的同时,还以周期 5s 做幅值为  $10^\circ$  的横摇与俯仰运动,设初始值:  $\theta(0)=\gamma(0)=0$ , A 点的经度  $110^\circ$ , 纬度  $45^\circ$ , 迭代周期  $\Delta T=0.05\text{s}$ 。显然,在任一点,  $V_E=V\sin\alpha$ ,  $V_N=V\cos\alpha$ , 且实际俯仰角  $\theta$  和横摇角  $\gamma$  分别为

$$\theta = \theta_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{T}\right)$$

和

$$\gamma = \gamma_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{T}\right)$$

$\theta_{\max}=\gamma_{\max}=10^\circ=0.1745\text{rad}$ ,  $T$  是周期,  $T=5\text{s}$ , 则载体运动的角速度分别为

$$\omega_x = \dot{\theta} = 0.1745 \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T}\right)$$

$$\omega_y = \dot{\gamma} = 0.1745 \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T}\right)$$

$$\omega_z = 0.0055 \text{ rad/s}$$

仿真分别由算法一(不忽略地理坐标系运动角速度的算法)与算法二(忽略地理坐标系运动角速度的算法)计算出姿态角,然后比较二者之间的误差,图 22.12 (a)和(b)分别为由算法一、算法二计算的 60s 的航向角的运动趋势,其中最大值分别为 0.327476 和 0.3274676rad。图 22.12(c)为二者间在 120s 内的误差曲线。图 22.13(a)和(b)分别为由算法一和算法二计算的俯仰角  $\theta$  在 60s 内的运动规律,其幅值分别为 0.1741229rad 和 0.1741217rad。图 22.13(c)为二者间的误差曲线,图 22.14(a)和(b)为横摇角  $\gamma$  的运动规律,幅值分别为 0.1769883rad 和 0.176981rad。图 22.14(c)为误差曲线。

从以上仿真结果可看出,二种算法间的误差量级为  $10^{-5} \sim 10^{-4}$ rad, 尽管误差随时间积累,但短时间工作时算法造成的误差不大。

### 仿真三

仿真三是在前二个仿真的基础上,在  $\omega_x^F \omega_y^F \omega_z^F$  中加入陀螺漂移等因素造成的测量误差,仿真陀螺漂移等误差对姿态测量和解算的影响,从而推导出对陀螺漂移等技术指标的最低要求。陀螺漂移造成的误差随时间积累,必然对姿态测量精度产生很大的影响。压电射流速率陀螺的漂移以  $\text{mV}/^\circ/\text{s}/\text{h}$  为单位计量,因此,如漂移量为  $X$ ,则在每个叠代点  $i$  的漂移增量为

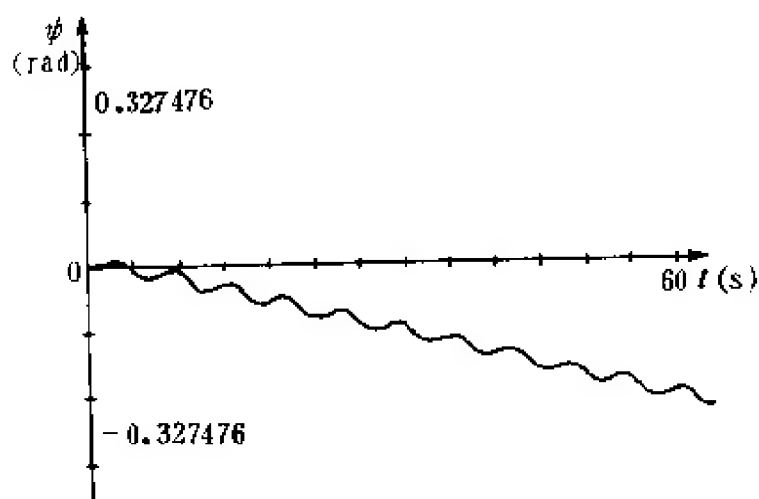
$$\left[ \left( \frac{iX\Delta T}{3600} \right) / 57.3^\circ \right] \text{rad/s}$$

$X$  的单位为  $^\circ/\text{s}/\text{h}$ 。仿真采用算法二进行,分别计算在理想情况下(即不存在陀螺漂移等)与非理想情况下(即漂移  $\neq 0$  时)姿态解算结果,并比较二者之间的误差。

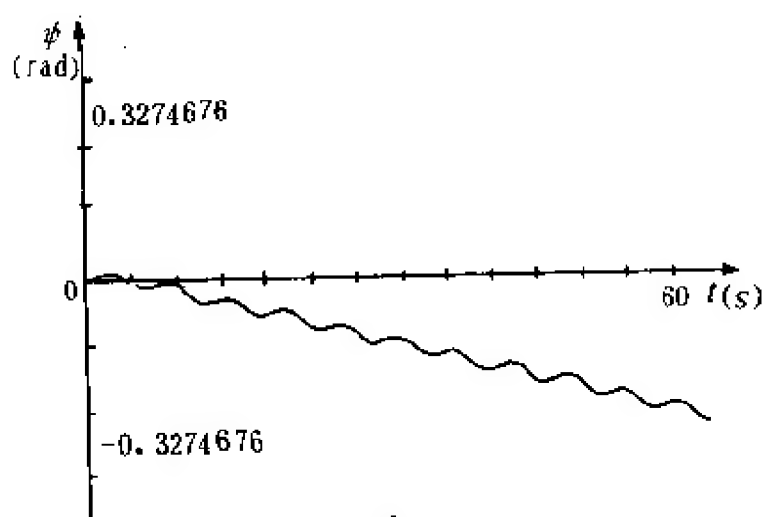
在仿真程序设计中,取  $X$  分别为  $1^\circ/\text{s}/\text{h}$ ,  $0.1^\circ/\text{s}/\text{h}$ ,  $0.01^\circ/\text{s}/\text{h}$ ,  $0.001^\circ/\text{s}/\text{h}$ , 仿真结果如图 22.15、图 22.16、图 22.17 和图 22.18 所示。

由以上仿真结果可看出,迭代 2400 个点,即 120s 后,  $X=1$

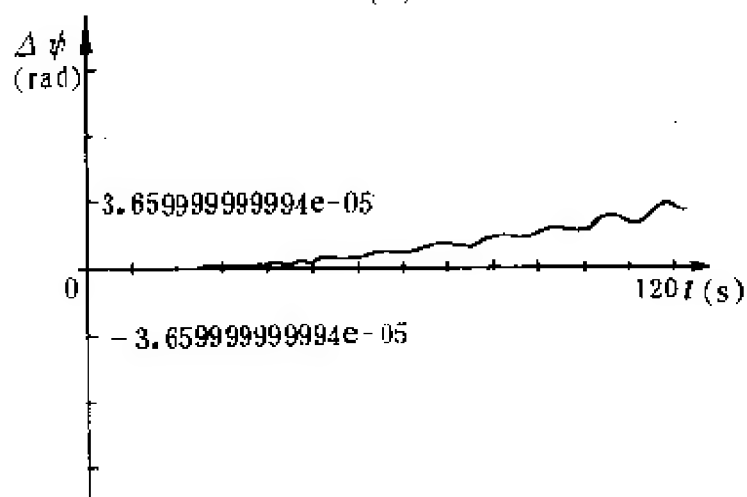




(a)



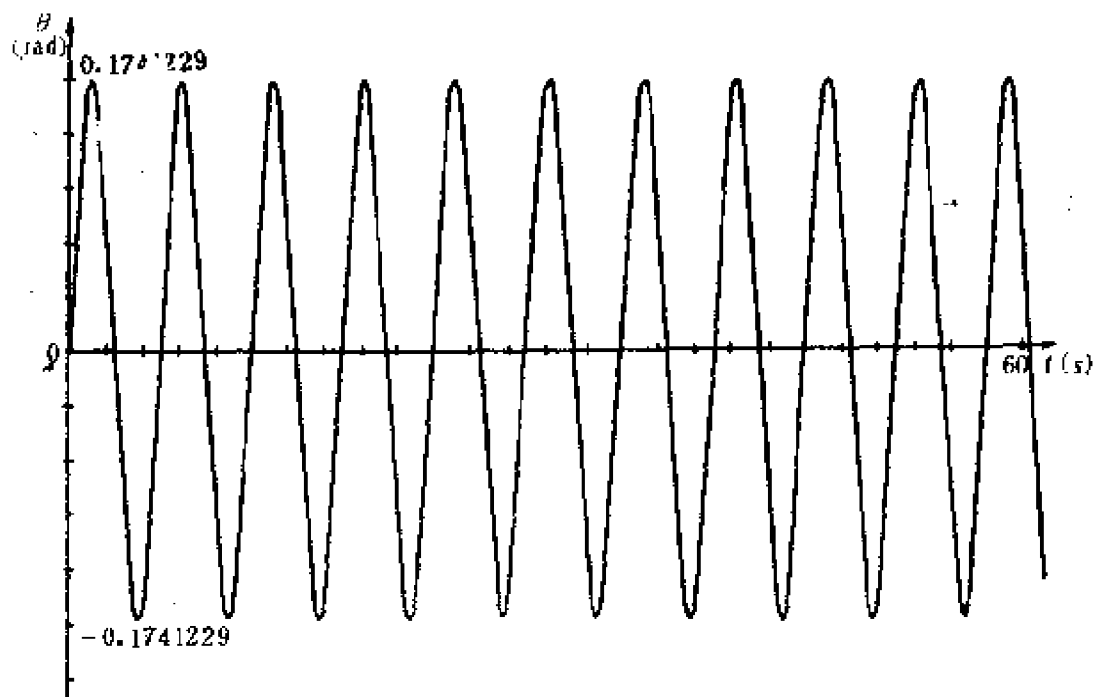
(b)



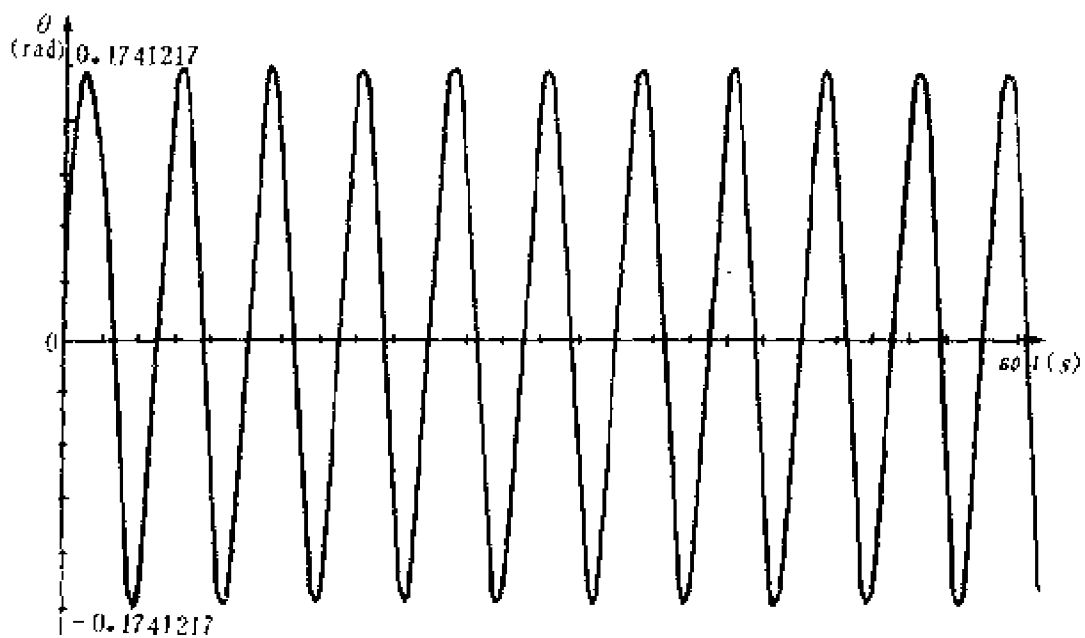
(c)

图 22.12 由算法一和算法二计算的航向角  $\phi$  的运动趋势与误差曲线

时所造成的姿态最大误差为  $0.04\text{rad}$ ，约  $2.3^\circ$ ， $5\text{min}$  后误差可达  $8^\circ$ 。 $X=0.01$  时  $120\text{s}$  的最大误差为  $0.0004\text{rad}$ ，约  $0.023^\circ$ 。 $X=0.001$  时， $120\text{s}$  的最大误差为  $0.0023^\circ$ ， $10\text{min}$  后达到  $0.01^\circ$ 。因此，即使在短时间工作的条件下，陀螺的漂移最大不能超过  $0.01^\circ/\text{s/h}$ ，否则用它设计的姿态传感器难于应用。



(a)



(b)

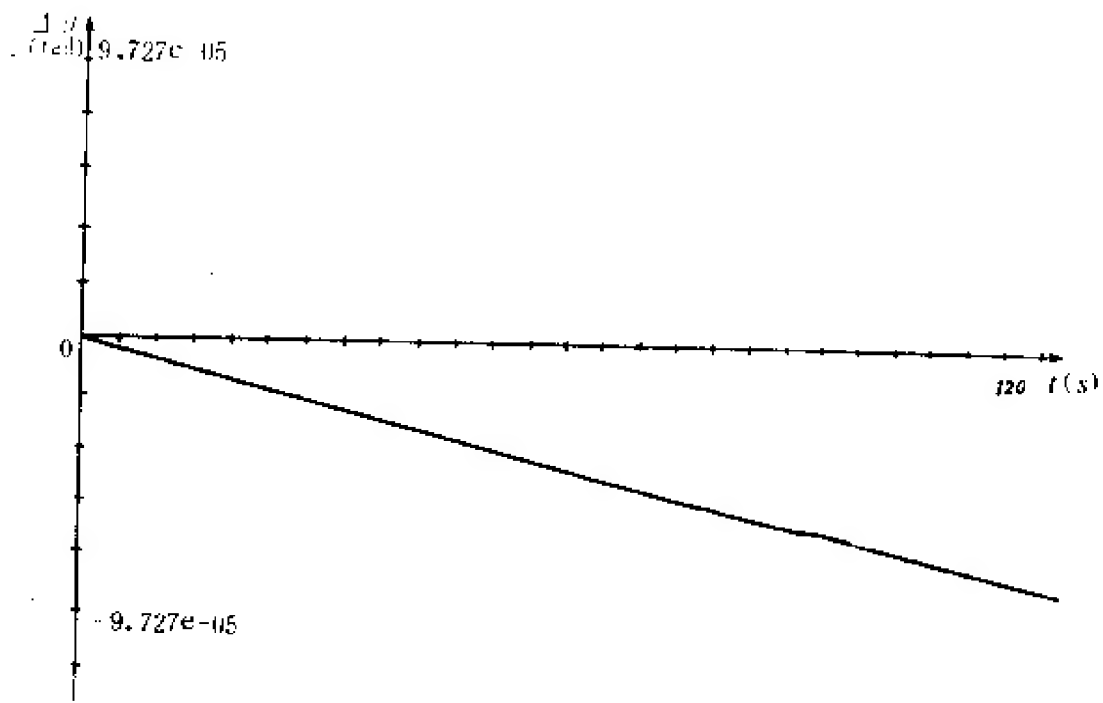
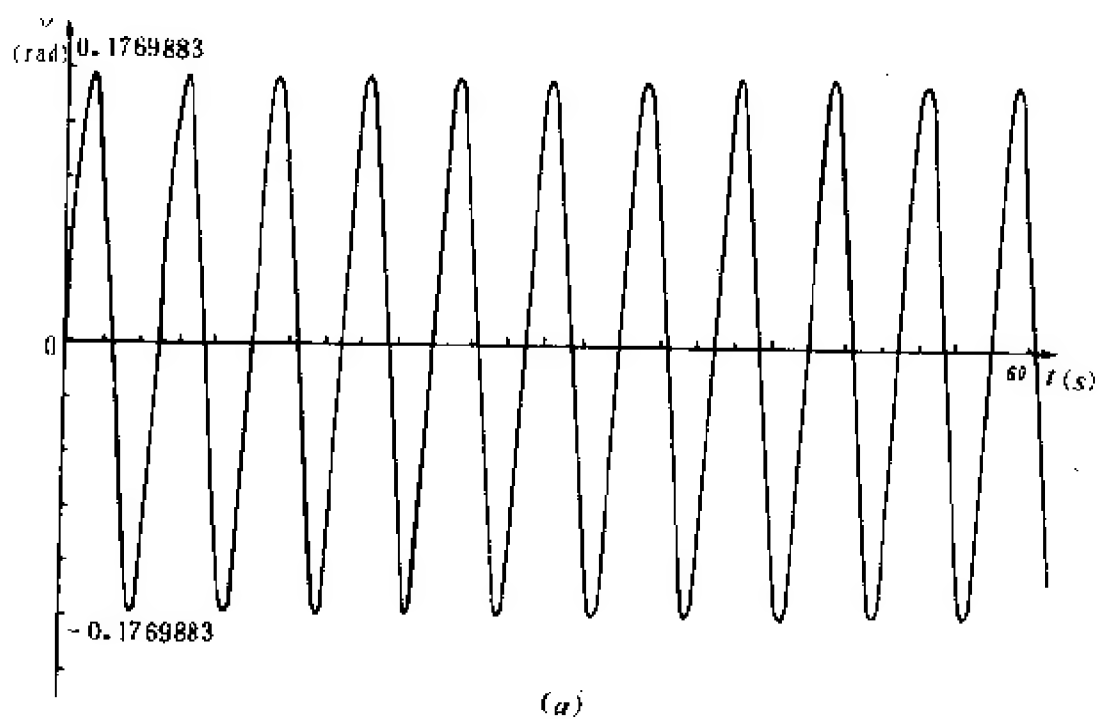
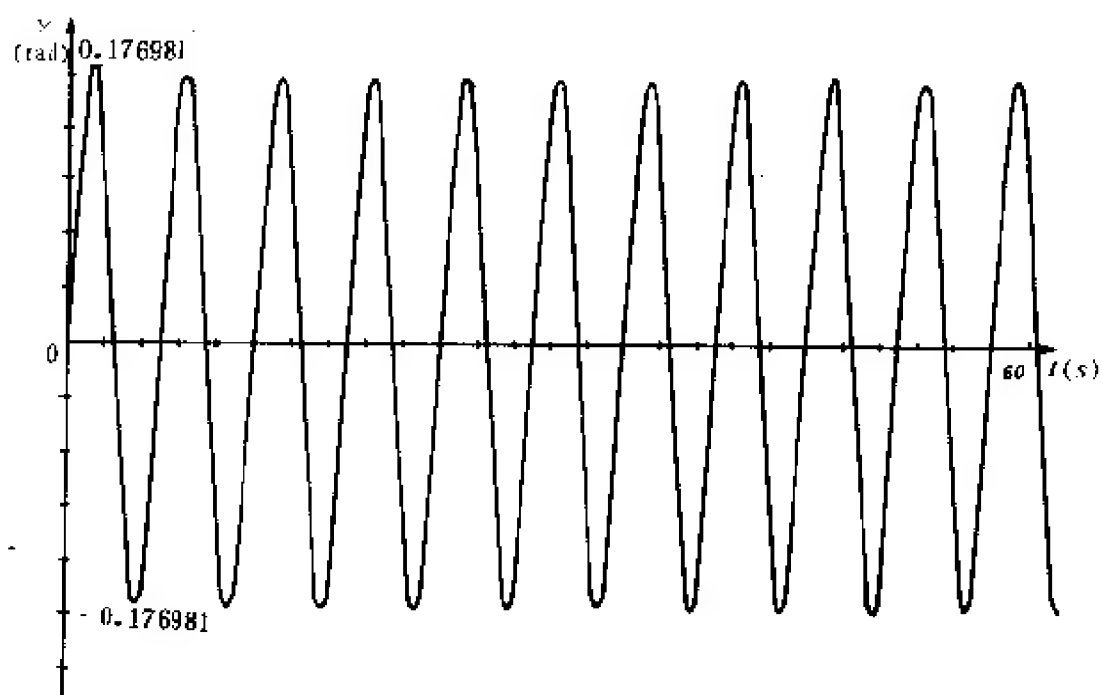
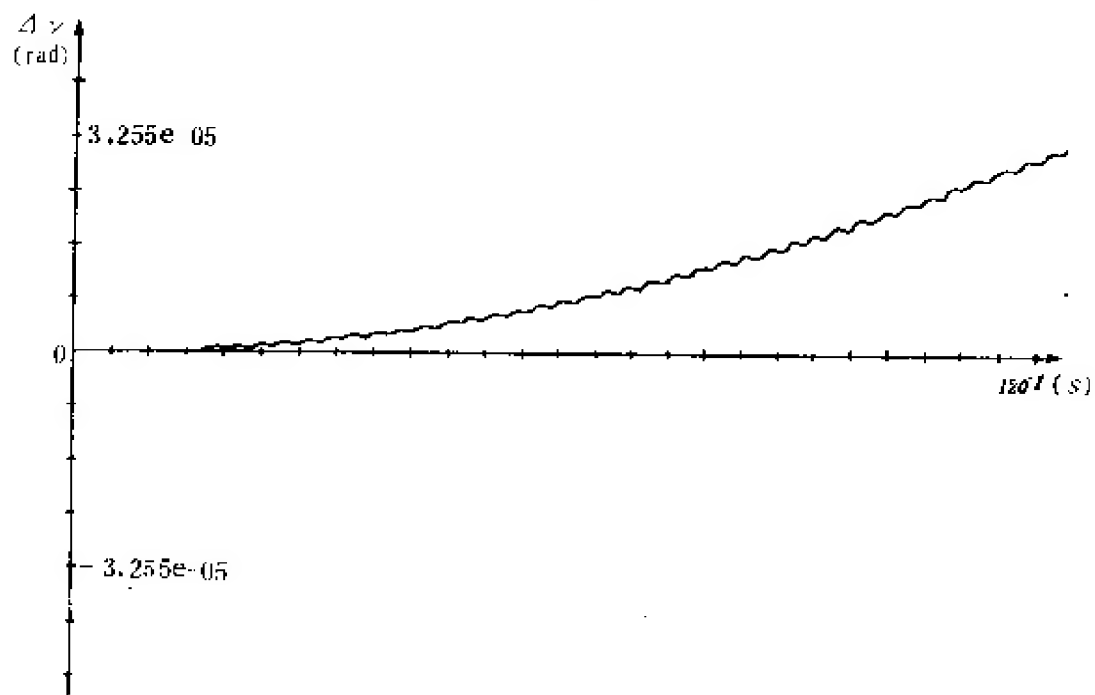


图 22.13 由算法一和算法二计算的俯仰角  $\theta$  的运动规律与误差曲线



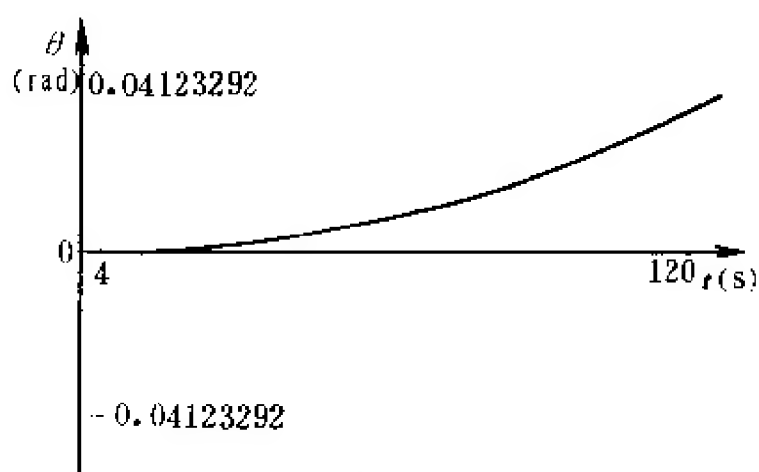


(b)

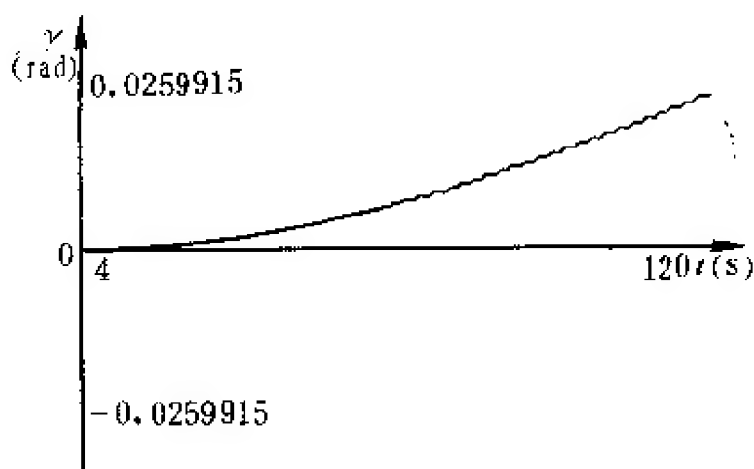


(c)

图 22.14 由算法一和算法二计算的横摇角  $\gamma$  的运动规律与误差曲线



(a)  $X=1$  时  $\theta$  值及误差



(b)  $X=1$  时  $\gamma$  值及误差

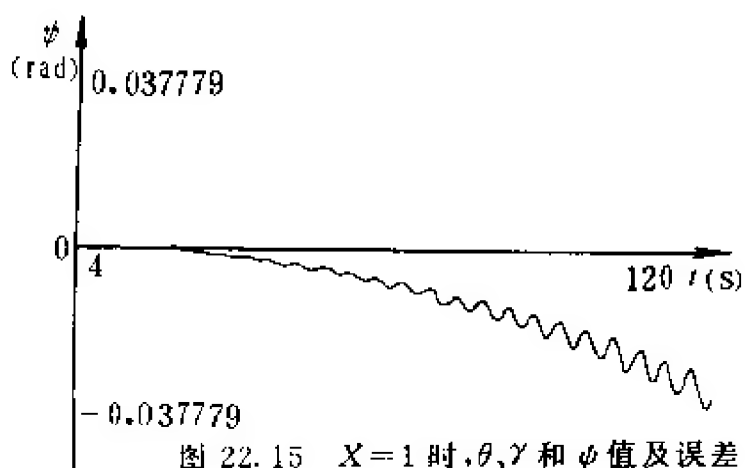
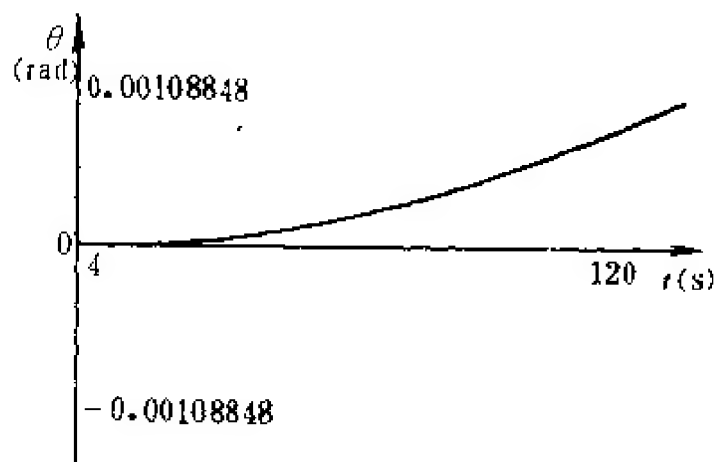
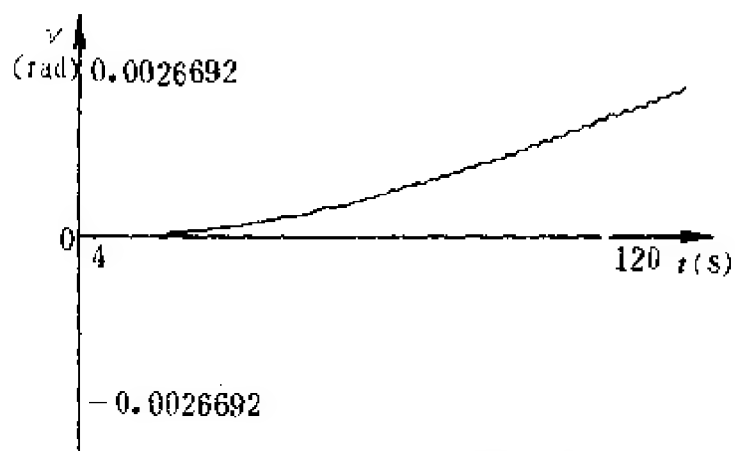


图 22.15  $X=1$  时,  $\theta$ ,  $\gamma$  和  $\phi$  值及误差



(a)  $X=0.1$ 时,  $\theta$ 值及误差



(b)  $X=0.1$ 时  $\gamma$ 值及误差

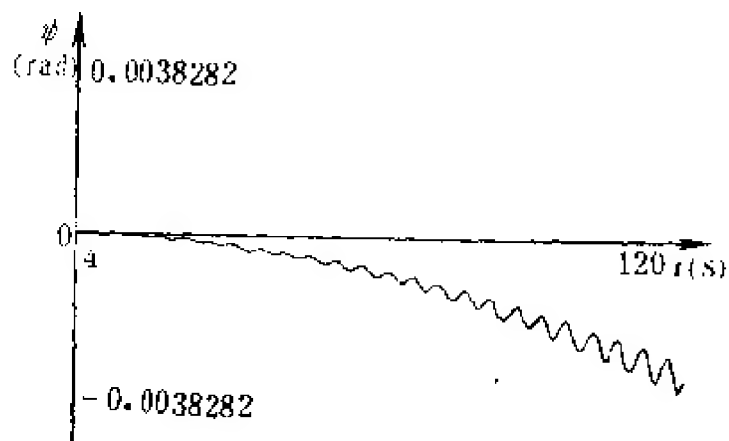
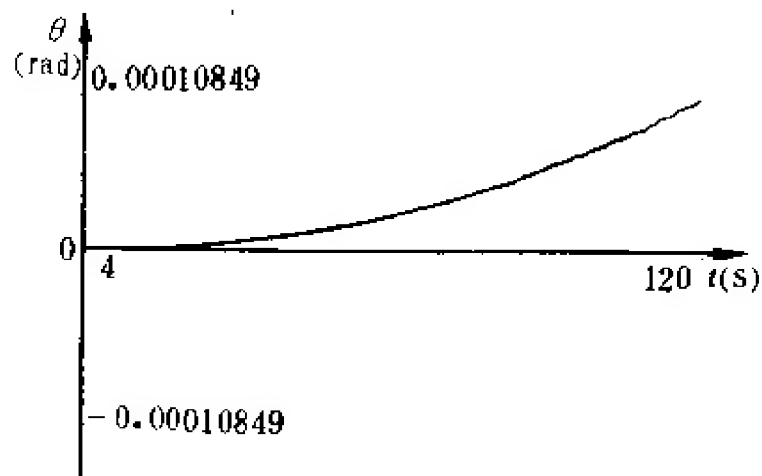
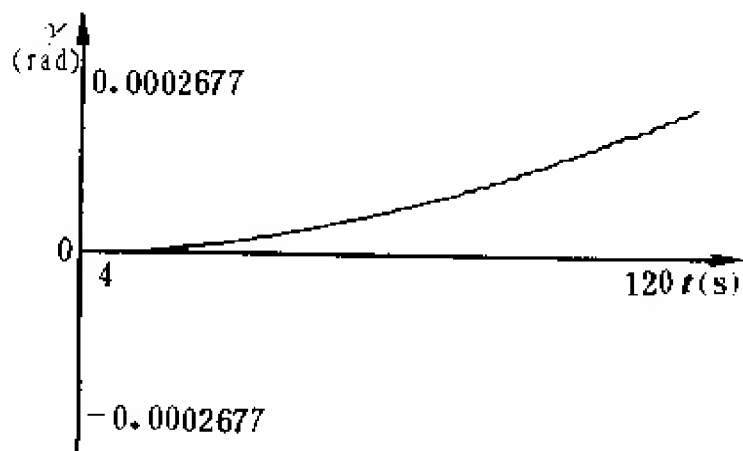


图 22.15  $X=0.1$ 时,  $\theta$ ,  $\gamma$ 和  $\phi$ 值及误差



(a)  $X=0.01$  时  $\theta$  值及误差



(b)  $X=0.01$  时  $\gamma$  值及误差

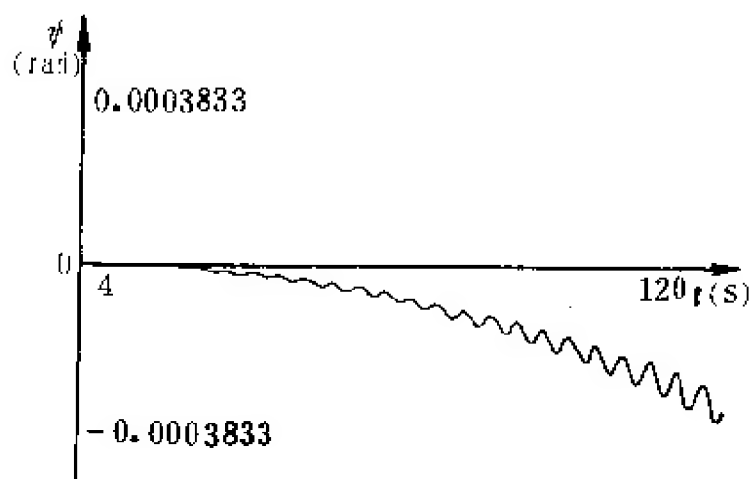
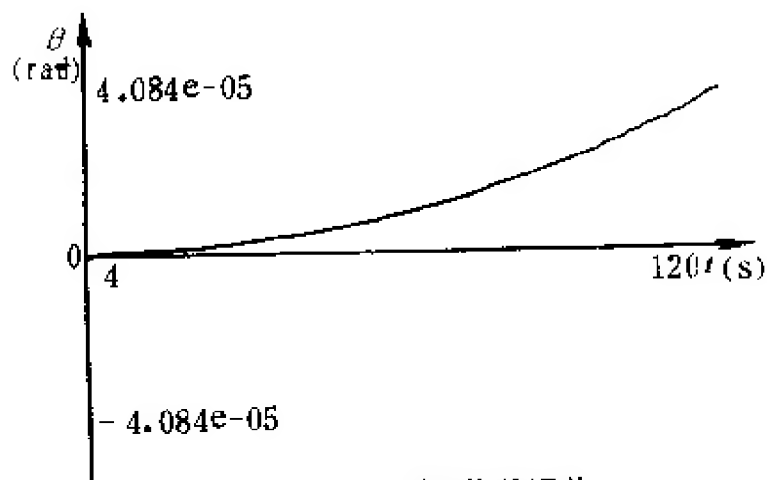
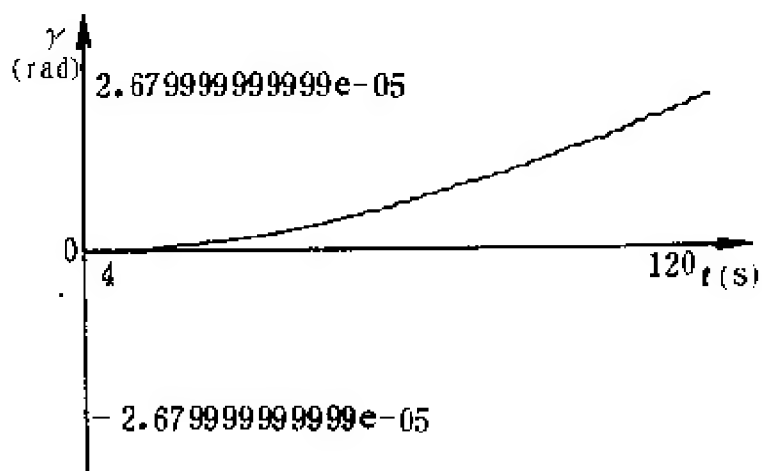


图 22.17  $X=0.01$  时,  $\theta$ ,  $\gamma$  和  $\phi$  值及误差



(a)  $X = 0.001$  时  $\theta$  值及误差



(b)  $X = 0.001$  时  $\gamma$  值及误差

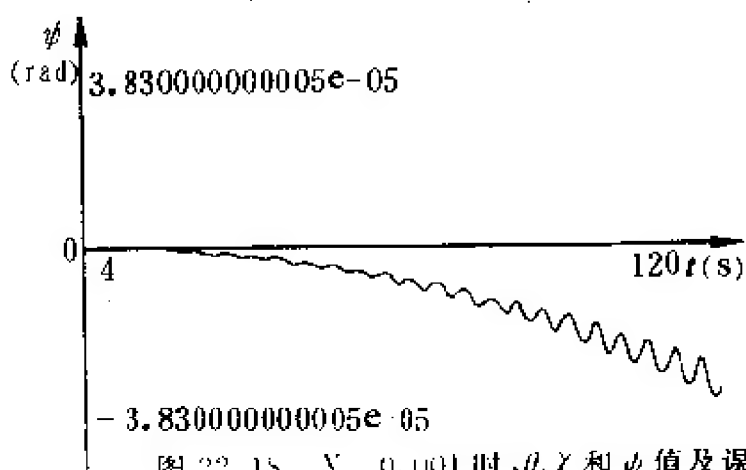


图 22.18  $X = 0.001$  时  $\theta$ 、 $\gamma$  和  $\phi$  值及误差



## 22.4 姿态传感器的构成

### 22.4.1 姿态传感器的构成及其软件设计

捷联式机器人姿态传感器由陀螺、加速度计、电路、计算机和输出显示等部分组成,其框图如图 22.19 所示。

姿态传感器系统包括三个压电射流速率陀螺和二一个气体线加速度计,被测载体的俯仰和横滚角度不大,且不要求测量载体运动的线加速度,故线加速度计用气体摆式倾角传感器代替。三个压电射流速率陀螺分别沿载体的纵轴  $Y$ 、横轴  $X$  和垂直轴正方向  $Z$  安装。陀螺的敏感轴互相垂直,用以测量沿载体  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上的运动角速率。两个气体摆式倾角传感器沿  $X$  和  $Y$  轴方向安装,用以提供载体在静止情况下的初始俯仰和横摇参数。由于压电射流速率陀螺的分辨率较低,不能用于测量地球自转角速度,故这种姿态传感器不能提供初始方位角。初始方位角以传感器开机时的方向为初始方向,此时的方位角定义为零,即  $\psi(0)=0$ 。或者由磁传感器、GP 等提供初值方位角。陀螺和加速度计的安装如图 22.20 所示。

陀螺和加速度计的电路包括电源、放大、滤波和压电泵激励电路。

计算机和输出显示部分包括计算机、数据采集电路、显示控制电路等。由前面方程的简化可看出,传感器的姿态解算运算工作量不大,为降低成本和开发方便,可采用运算速度较低的单片微型计算机作为姿态解算的处理器,比较各种常用的微处理器,这里选用 Intel 公司生产的 MC8098 单片机。与 8051 系列的单片机相比,8098 单片机是准 16 位机,其外部数据总线为 8 位,易于与其他 8 位的外围器件接口,但其寄存器为 16 位,内部 RAM 可以进行 16 位的字操作及 32 位的双字操作,而且有较为丰富的 8 位和 16 位

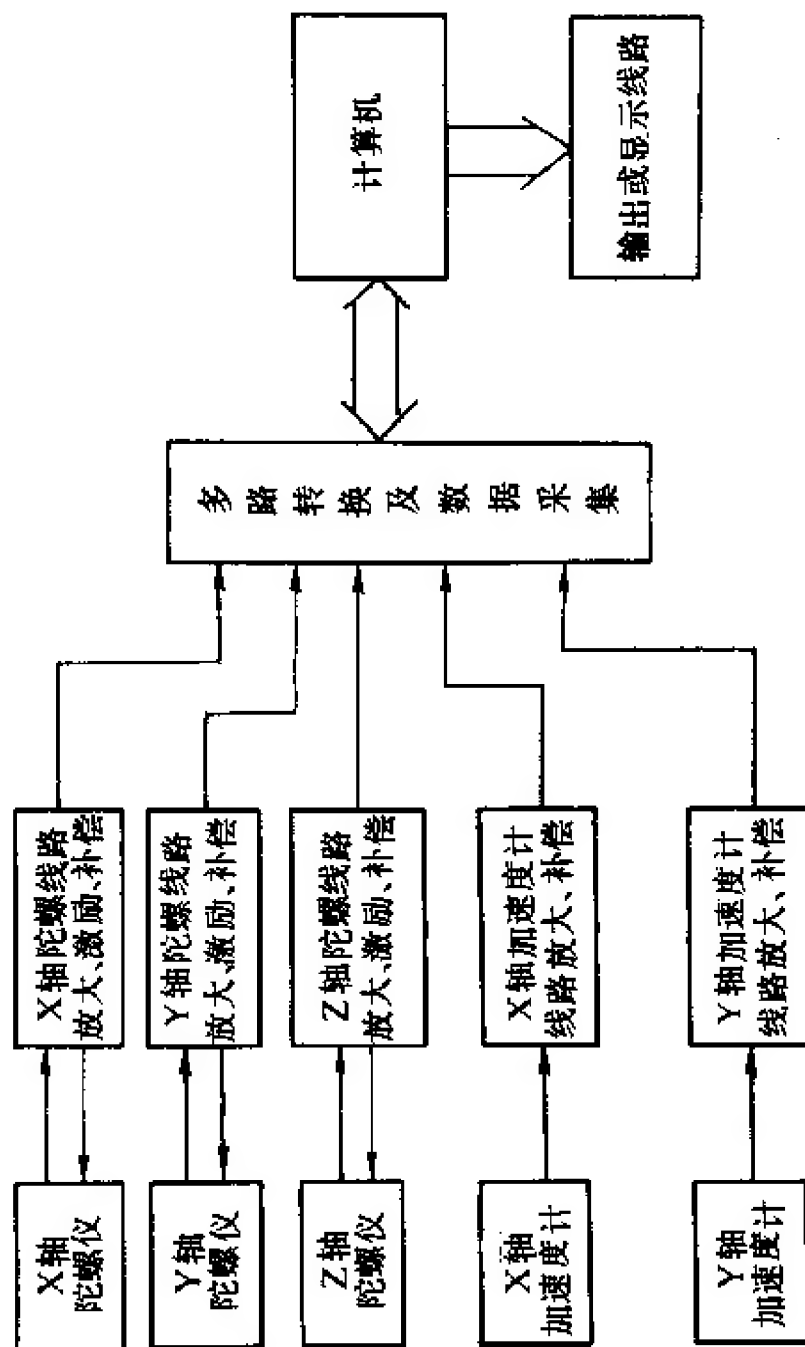


图 22.19 姿态传感器框图

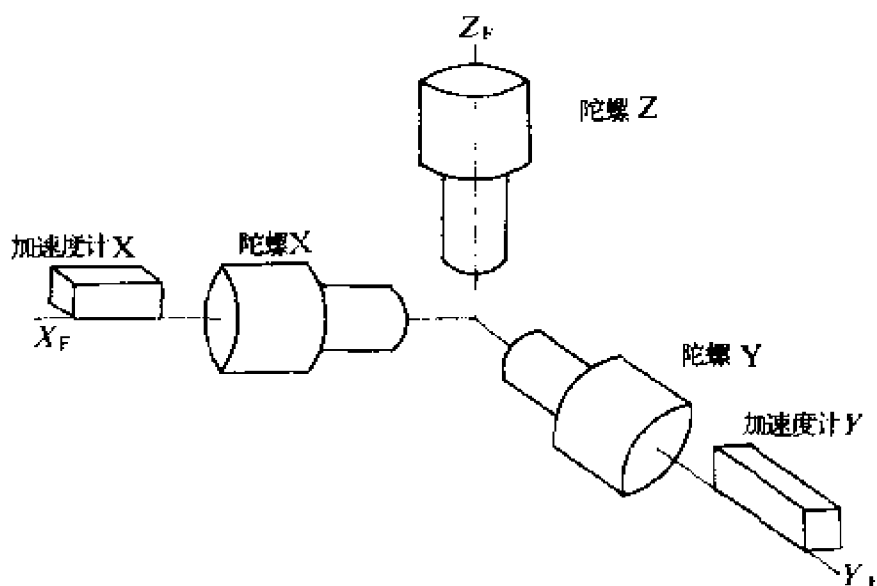


图 22.20 安装示意图

运算指令,便于处理 16 位数据。

姿态传感器中需要处理二个气体摆式倾角传感器和三个压电射流速率陀螺的输出信号,倾角传感器的信号范围是 $\pm 5\text{VDC}$ ,速率陀螺的输出信号范围也是 $\pm 5\text{VDC}$ ,其灵敏度分别为  $300\text{mV}/^\circ$  和  $150\text{mV}/^\circ/\text{s}$ 。如果采用单片机片内的 A/D 转换器,由 A/D 转换器造成的最小分辨误差

$$\Delta = \frac{10\text{V}}{2^{10} - 1} = 9.775\text{mV}, \text{约为 } 10\text{mV}$$

对倾角传感器来说,相当于约  $0.03^\circ$ ,对陀螺来说约相当于  $0.06^\circ/\text{s}$ 。这样的精度比较差,因此应选用更高位数的 A/D 转换器,根据整机的性能价格比,可选用 12 位的 A/D 转换器 AD574A 和 12 位的 D/A 转换器 DAC1210。AD574A 是一种低成本的 12 位的 A/D 转换器,其非线性误差为 1LB,约  $2.4\text{mV}$ ,相当于  $0.0018^\circ$  的倾角传感器误差和  $0.0016^\circ/\text{s}$  的角速度误差。AD574A 具有较高的转换频率,其转换时间为  $35\mu\text{s}$ ,如果每个通道采样 10 个数据,扫描 5 个通道仅  $1.75\text{ms}$ ,足以满足数据处理的要求。

计算机部分的原理图如图 22.21(见插页)。图中,LF13508 为

8 选 1 的多路转换开关,用以在某一固定时刻选择一路信号至 A/D 转换器,  $A_0 \sim A_2$  为八个通道的选通输入。6116 为 2KB 的静态 RAM。姿态解算必须采用浮点数运算,故运算量较大,运算时间也较长,且要占比较多的内存。单片机内的 RAM 区的每一个字节或字均可以用作累加器,且存取时间相对外部存储器要短得多。因此,要计算中间过程量,常用的变量和一部分保留区(留作计算中暂存数据)留给内部 RAM,而堆栈、不常用到的变量和常数,每一步计算的过程结果和需要输出的量均置于外部 RAM,这样可以提高运算速度,同时有足够的外部 RAM 空间可提供使用。8098 可寻址 64KB 存储空间,完全可以满足运算的程序及数据区的空间要求。

2764 是 8KB 的 EPROM(由紫外线擦除),用于存放程序和常数。8098 复位后将从 2080H 地址开始取指执行程序。2000H 到 207FH 存放中断向量,程序可放置的空间为从 2080H 到 3FFFH。DAC1210 为 12 位 D/A 转换器,电流输出。因为输出的是三路信号,故用三个采样保持器 LF198 保持输出信号。

## 22.4.2 姿态解算的软件设计

载体姿态的计算要求解三角函数与反三角函数,因此只有采用浮点运算才可保证精度。用于开发 8098 单片机的 EUD98 单片机开发系统具有较为丰富的浮点运算库,可以直接调用姿态解算所需要的浮点运算软件。除 A/D、D/A 转换部分以外,均采用 PL/M 高级语言编写,PL/M 高级语言是 Intel 公司提供的一种高级开发语言,支持 Intel 公司生产的计算机芯片。采用 PL/M 语言编写大部分程序和所有的数学运算部分的程序,不仅使程序的编写大为简化,而且其汇编代码能根据用户的选择得到不同程度的优化。采用 PL/M 语言编写大部分软件的另一个优点是具有良好的可移植性,由于 PL/M 语言是针对 Intel 公司生产的计算机芯片而开发的,当 8098 的容量和处理速度不能满足传感器精度要求

时,可以选用 8086,80286 等芯片作为处理芯片,而程序不会有太多的修改即可在其他计算机上运行。当然,PL/M 语言作为一种高级语言,必然有其缺点,即对运行时间的控制不很完善,因此,在需要精确控制时间的场合,如 A/D,D/A 转换,还必须用汇编语言,将这些对外设的操作编成一个个的模块,以备调用。

通过上一节的分析可知,将方程简化后只要解四个微分方程即可求得姿态角,即解方程

$$\begin{cases} \dot{T}_{31} = T_{32}\omega_{iFZ}^F - T_{33}\omega_{iFY}^F \\ \dot{T}_{32} = -T_{31}\omega_{iFZ}^F + T_{33}\omega_{iFX}^F \\ \dot{T}_{33} = T_{31}\omega_{iFY}^F - T_{32}\omega_{iFX}^F \\ \dot{\phi} = \frac{1}{1 - T_{32}^2}(T_{31}\omega_{iFX}^F - T_{33}\omega_{iFZ}^F) \end{cases} \quad (22.25)$$

采用一阶欧拉法求数值解可得

$$\begin{aligned} T_{31}(k) &= T_{31}(k-1) + \Delta T[T_{32}(k-1)\omega_{iFZ}^F(k) - T_{33}(k-1)\omega_{iFY}^F(k)] \\ T_{32}(k) &= T_{32}(k-1) + \Delta T[-T_{31}(k-1)\omega_{iFZ}^F(k) + T_{33}(k-1)\omega_{iFX}^F(k)] \\ T_{33}(k) &= T_{33}(k-1) - \Delta T[T_{31}(k-1)\omega_{iFY}^F(k) - T_{32}(k-1)\omega_{iFX}^F(k)] \end{aligned} \quad (22.26)$$

$$\phi(k) = \phi(k-1) + \Delta T \frac{1}{1 - T_{32}^2(k-1)}[T_{31}(k-1)\omega_{iFX}^F(k) - T_{33}(k-1)\omega_{iFZ}^F(k)] \quad (22.27)$$

四阶 R-K 法的计算量较大,计算时间较长,且编程较为复杂。对倾角传感器和陀螺的信号进行了实际的仿真后发现,采用一阶欧拉法与用四阶 R-K 法的算法误差相差不大,故可采用一阶欧拉法编程。

陀螺和倾斜仪的动态响应是一个一阶过程,其阶跃响应时间为 50ms~80ms。对于频率太高的姿态变化会得不到响应,故进行软件设计时,确定迭代周期为 100ms,即  $\Delta T=0.1s$ 。时间的控制由软件定时器实现,每次定时时间到,则转入软件定时器中断服务子程序,在中断服务子程序中完成对陀螺的采样、A/D 转换和姿态角的计算。在中断服务子程序的开始,重写软件定时器,使之可

以产生下一次 0.1s 的定时中断。

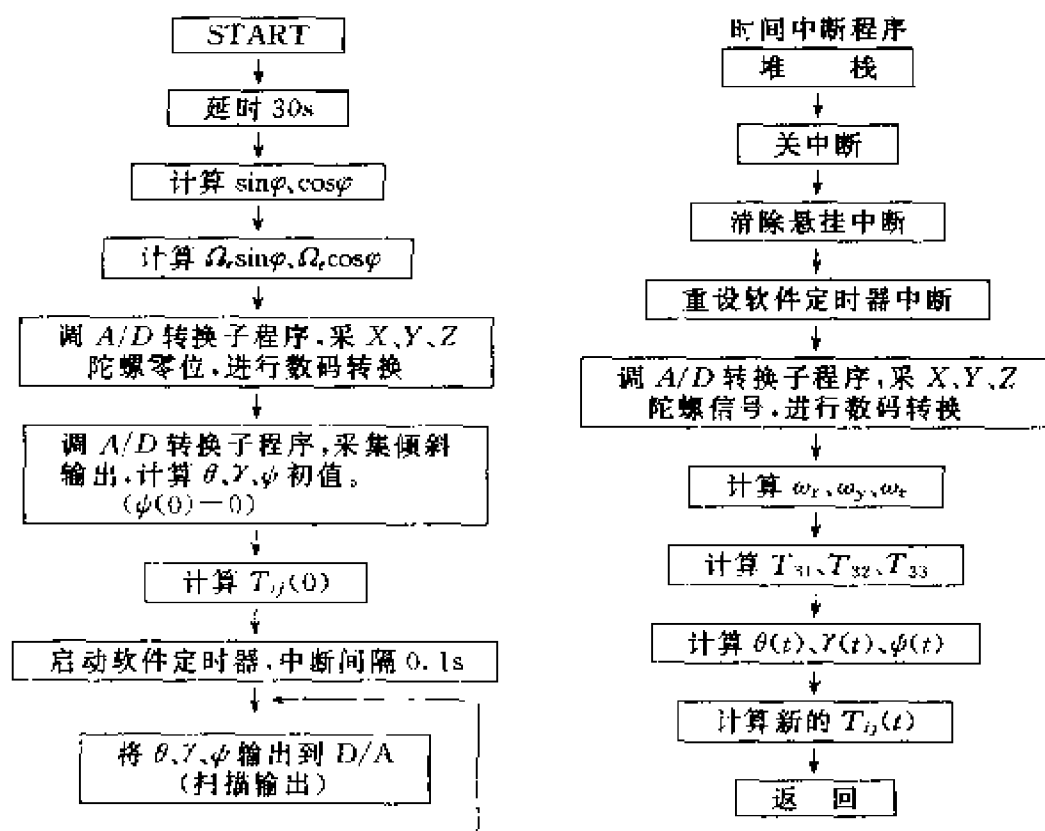


图 22.22 主程序框图

在所有计算中,角度单位为弧度(在显示及输出时转换成度)。角速度单位为 rad/s,每台陀螺及倾斜仪的灵敏度经重复测量后写入主程序中。陀螺及倾斜仪的灵敏度、零位等量的测试由计算机进行,并经过最小二乘法拟合后给出,主程序框图如图 22.22 所示。

## 22.5 气流式水平姿态传感器

前面介绍的是三维姿态传感器,但在许多应用场合只要给出水平姿态就能满足要求。传统的水平姿态传感器有固体摆式和液体摆式两类,它们能满足一般使用要求,但在强振动和高冲击条件下,则难于正常工作,原因是“固体摆”和“液体摆”在高过载时均产生大的惯性力。为了克服这一难题,我们研制了气体摆式水平姿态

传感器。在有限密封腔内,“气体摆”的质量几乎为零,故气体摆式水平姿态传感器能承受强振动和高冲击。此外,“气体摆”式水平姿态传感器还有成本低、可靠性高等优点,因而它一问世就受到广大用户青睐,已在航天、航海、兵器、机器人、桥梁、建筑、钻探等领域应用,先后获电子部科技进步奖和国家发明专利<sup>[10~33]</sup>。

### 22.5.1 气体摆

在重力场中,热气(密度小的气体)上升,冷气(密度大的气体)下降,从而形成热气流束。这种热气流束受到一个浮升力作用,无外力作用时,这种热气流束保持跟重力方向相反的浮升力方向,有外力作用时,热气流总是力图保持在浮升力方向。热气流束的这种现象跟“固体摆”和“液体摆”受外力作用时摆总是力图保持在重力方向的现象一致,不同的仅是“固体摆”和“液体摆”受重力作用方向跟重力方向一致,而气流束受浮升力作用,方向跟重力方向相反。因此,重力场中密封腔内的热气流束具有“摆”的特性,可称为“气体摆”<sup>[33]</sup>。

### 22.5.2 气体摆式倾角传感器<sup>[31,32]</sup>

#### (1) 结构原理

气体摆式倾角传感器的结构原理如图 22.23 所示。敏感元件为柱状形,内腔密封惰性气体或干燥空气,热敏丝设置在其中,如图 22.23(a)所示。热敏丝通电时,其周围气体温度升高,密度下降,在重力场中,热敏丝周围低密度的热气体向上流动,形成自然对流。当传感器倾斜时,热气流仍保持在浮升力方向,即热气流与传感器的基准面形成一个角度。该角度可通过热敏丝配置来敏感,图 22.23(b)和(c)分别示出敏感角度的热敏丝的直线配置和平行配置。图 22.23(a)是平行配置热敏丝敏感元件剖面图。热敏丝  $r_1$  和  $r_2$  是电桥的两臂,在水平面内,  $r_1 = r_2 = r$ ,电桥平衡,输出为零。有倾角时,由于  $r_1$  和  $r_2$  的温度场相互影响,通常下侧的热敏

丝给上侧的热敏丝加热,因而  $r_1 \neq r_2$ , 输出信号为  $V_o$ , 其大小与倾角  $\theta$  呈线性关系,即

$$V_o = K \cdot \theta \quad (\theta \leq 45^\circ)$$

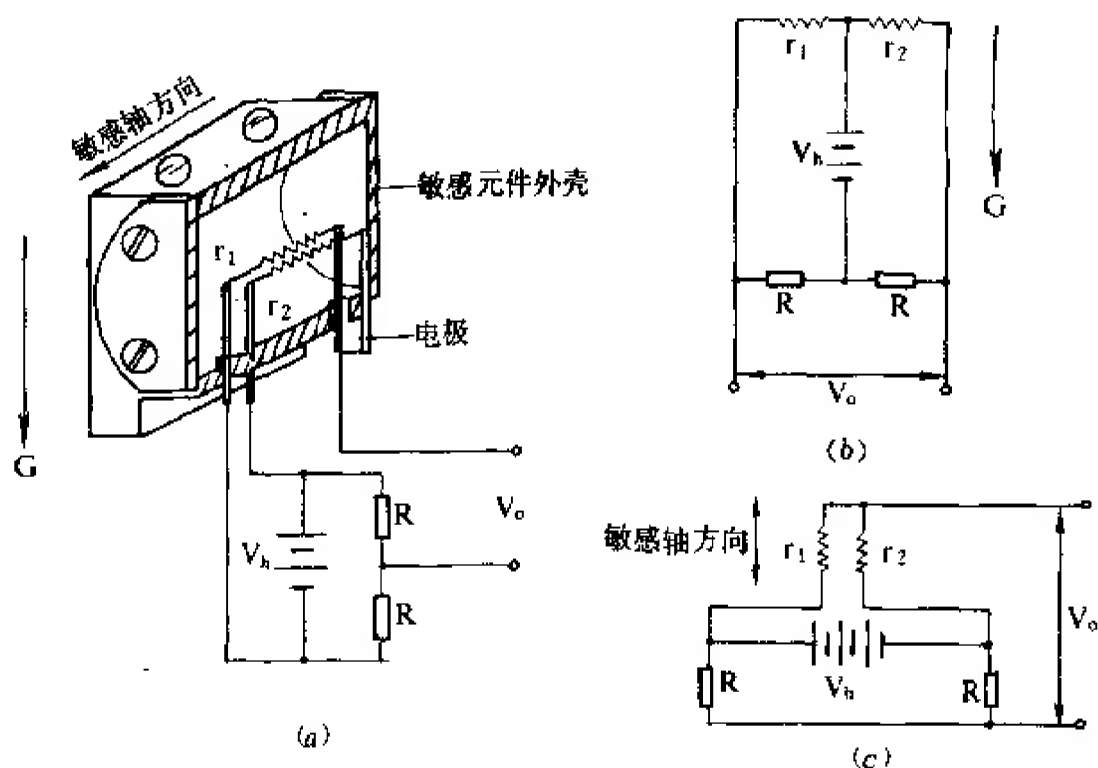


图 22.23 气体摆式倾角传感器的结构原理图

式中  $K$  是比例系数。通过信号处理,根据信号的大小和极性即可确定  $\theta$  的大小和倾斜方向。

## (2) 电路

气体摆式倾角传感器的电原理方框图如图 22.24 所示,其由放大器、滤波器、限幅器和零位补偿电路构成。

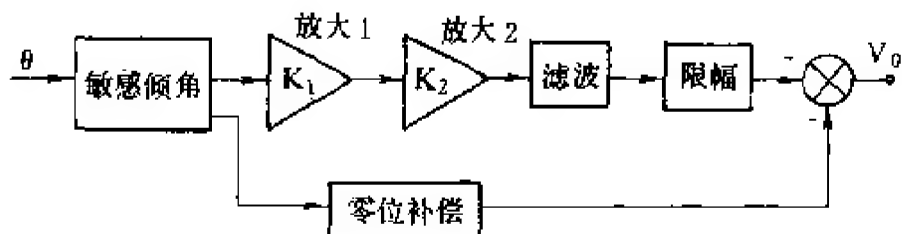


图 22.24 电原理方框图



气体摆式倾角传感器的实用电路如图 22.25(见插页)所示。传感器用 $\pm 12\text{VDC}$ 电源供电,放大器和补偿电路用 $\pm 8\text{VDC}$ 电源供电。LM317T 给电桥供电,其输出由 R3 和 R4 调节,如图 22.25(b)所示。电桥带有零位和低漂移调节用的可调电阻器。电桥有效输出在 $\pm 10\text{mV}$ 内,经三级放大后可得到大于  $300\text{mV}/^\circ$ 的灵敏度,如图 22.25(c)所示。第二级放大器用于温度补偿,第三级放大器用于滤波,输出电压纹波小于 $\pm 3\text{mV}$ 。

### (3)性能

根据上述原理结构和电路设计制作的气体摆式倾角传感器,其输出特性如图 22.26 所示。该传感器已有系列化产品,下表列出气体摆式倾角传感器(CJR)五个型号的产品性能。

**CJR 气体摆式倾角传感器产品性能**

型 号	CJR-1	CJR-2	CJR-3	CJR-4	CJR-5
量 程	$\pm 45^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 20^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 5^\circ$
灵敏度	$100\text{mV}/^\circ$	$150\text{mV}/^\circ$	$250\text{mV}/^\circ$	$500\text{mV}/^\circ$	$1000\text{mV}/^\circ$
线性度	1%	1%	0.5%	0.5%	0.5%
供电电源	$\pm 12\text{VDC}$				
耗电流	$< 75\text{mA}$				
分辨率	$0.01^\circ$				
频 响	10 Hz				
振 动	70 Hz, 4 g, 0.5 h				
冲 击	8 g, 80 次/min, 10 min				
潮 湿	$25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , 92~98% RH, 48 h				
储存温度	$-40 \sim +80^\circ\text{C}$				
工作温度	$-40 \sim +50^\circ\text{C}$				
重 量	300 g				
外形尺寸	$\phi 55 \times 66\text{mm}$				

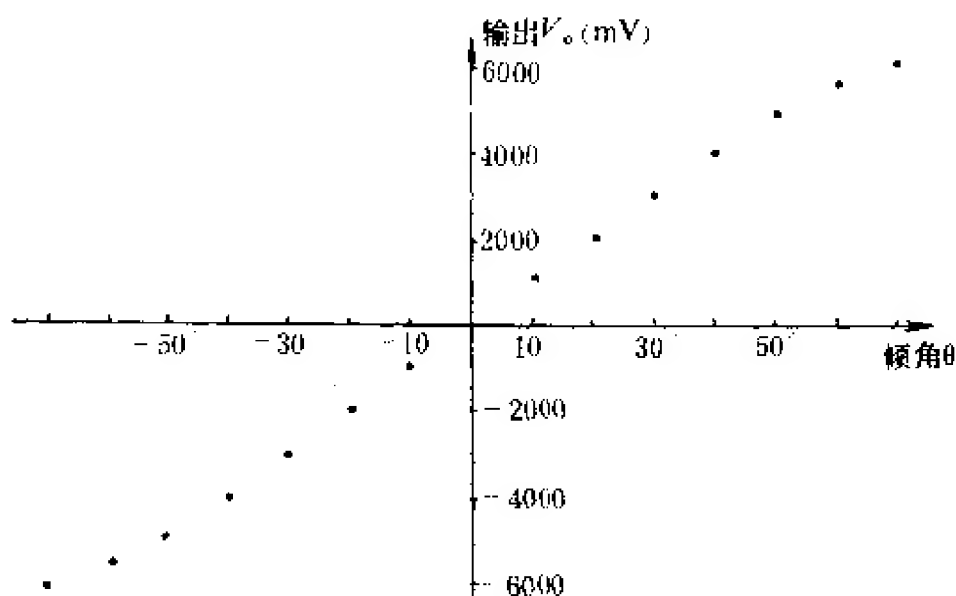


图 22.26 气体摆式倾角传感器的输出特性

### 22.5.3 气流式水平姿态传感器

上述气体摆式倾角传感器可用于敏感水平姿态角,但必须在静态或准静态条件下才能确保检测精度。若使用环境有外界加速度,则会给气体摆式倾角传感器的检测结果造成误差。由一个气体摆式倾角传感器和一个压电射流角速率传感器组成的气流式水平姿态传感器能消除干扰加速度的影响。

#### (1) 结构原理

气流式水平姿态传感器的原理框图如图 22.27 所示。设气流式倾角传感器的输出

$$V_I = V_{I_0} + K_1(\theta + \theta_s) \quad (22.28)$$

式中  $V_{I_0}$  是零位电压,  $\theta$  是倾斜角度,  $\theta_s$  是与干扰加速度有关的误差角度,  $K$  是系数。对倾角传感器的输出微分,结果如下:

$$\frac{dV_I}{dt} = K_1(\omega + \frac{d\theta_s}{dt}) \quad (22.29)$$

式中  $\omega$  是运动载体的倾动角速度。

设压电射流角速率传感器的输出

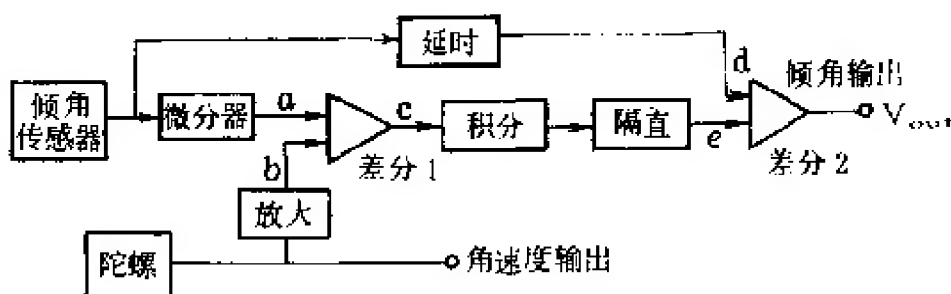


图 22.27 气流式水平姿态传感器的原理框图

$$V_r = K_2(\omega + \omega_b) \quad (22.30)$$

式中  $\omega_b$  是角速度传感器的偏值角速度。由式(22.29)和式(22.30)得

$$\frac{dV_I}{dt} - V_r = (K_1 - K_2)\omega + K_1 \frac{d\theta_a}{dt} - K_2\omega_b \quad (22.31a)$$

通过电路调整使  $K_1 = K_2 = K$ , 则

$$\frac{dV_I}{dt} - V_r = K(-\omega_b + \frac{d\theta_a}{dt}) \quad (22.31b)$$

积分式(22.31b), 则

$$V_I = K \int_0^t (-\omega_b)dt + K\theta_a + const + V_{I_0} \quad (22.32)$$

式中 const 是积分常数。由图 22.27 可看出

$$\begin{aligned} V_e &= V_a - V_b \\ &= \frac{dV_I}{dt} - V_r = K(-\omega_b + \frac{d\theta_a}{dt}) \end{aligned} \quad (22.33)$$

最后倾角输出

$$V_{out} = V_a - V_e \quad (22.34)$$

$$V_a = V_I = V_{I_0} + K(\theta + \theta_a) \quad (22.35)$$

$$V_r = K \int_0^t (-\omega_b)dt + K\theta_a + const \quad (22.36)$$

将式 22.35 和式 22.36 代入式 22.34 得

$$V_{out} = K\theta + K \int_0^t \omega_b dt + V_{I_0} - const \quad (22.37)$$

通过消除  $\omega_b$  产生的直流分量和甚低频分量则可近似得到

$$K \int_0^t (\omega_b) dt = > 0$$

而  $V_{10} - \text{const}$  为零位电压值, 取得  $V_{10} - \text{const} = 0$ , 则可得到无干扰加速度的倾角输出, 即

$$V_{\text{out}} = K\theta$$

## (2) 电路

气流式水平姿态传感器的电路如图 22.28 所示, 运算放大器 LF412-1A 提高增益。 $C_1$  是微分电容器, 其与  $R_1$  的最大乘积不宜过大。 $C_2$  和  $C_3$  是调整相位的电容。通过 LF412-2A 调节增益, 使倾角传感器的输出与微分后信号强度匹配。运算放大器 LF412-2B 构成减法器。 $C_4$  是积分电容器,  $R_4$  是限流电阻。图中没有隔直流电路, 但有相同作用的元件  $R_5$ ,  $R_8$  和  $R_9$  通常较大。倾角传感器输出到电阻之间应设置延时电路, 这样可提高水平姿态传感器抗干扰能力和精度。

## (3) 抗干扰能力实例

根据上述结构原理和电路设计制作的气流式水平姿态传感器能将干扰加速度造成的输出误差减小 95% 以上。图 22.29 示出气流式水平姿态传感器和气体摆式倾角传感器输出特性比较。由图中可看出, 在迅速倾斜  $10^\circ$  时, 气体摆式倾角传感器由于干扰加速度而造成显著的误差, 并且停止干扰后还不能立即达到正常状态, 然而气流式水平姿态传感器的输出则几乎不受干扰加速度的影响。一旦停止倾斜, 输出立即达到正常状态。

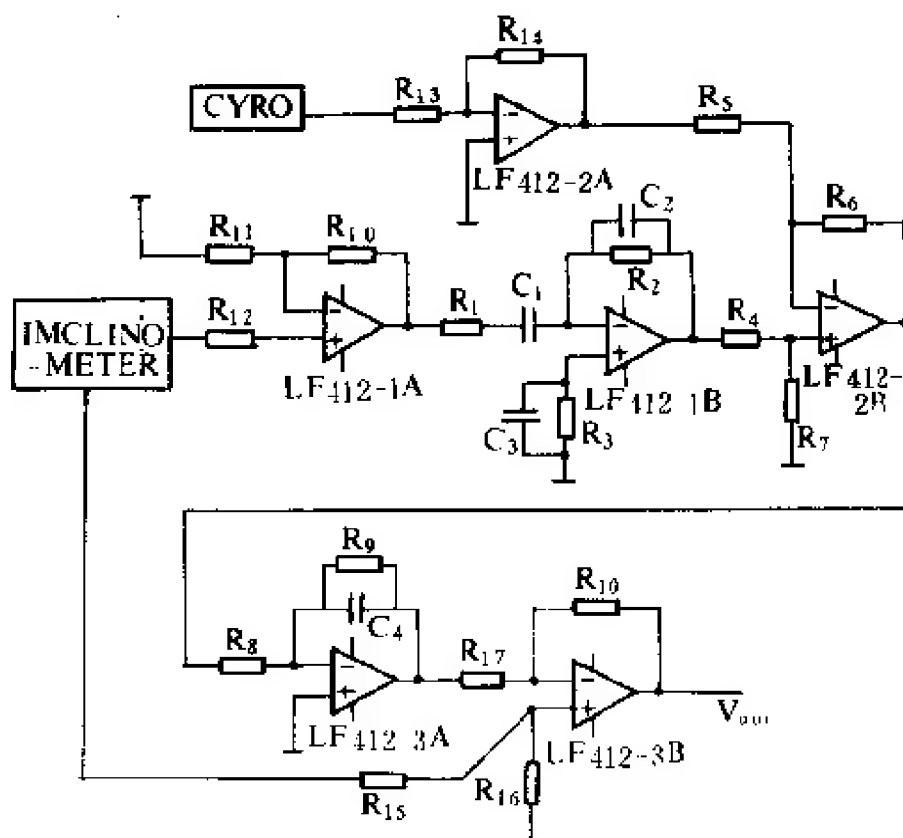


图 22.28 气流式水平姿态传感器电路

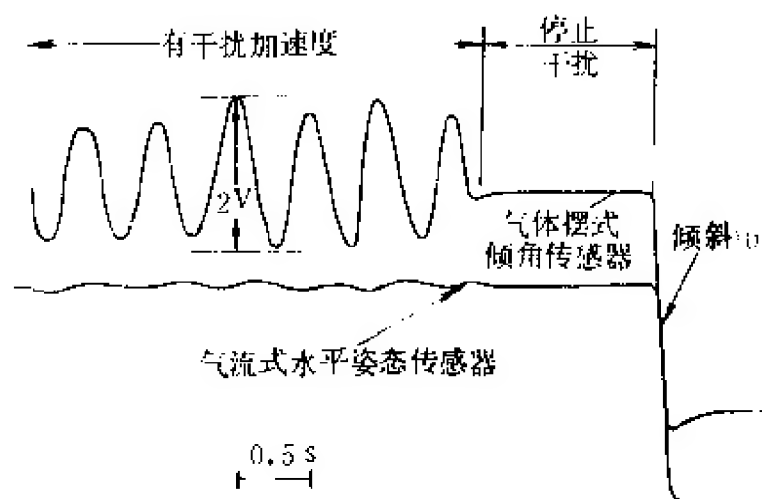


图 22.29 气体摆式倾角传感器和气流式水平姿态传感器抗干扰能力比较

# 第三编

## 机器人语言与听觉

人与机器人交互作用的装置包括人发出指令的装置和机器人向人报告的装置,这些装置列于下表中<sup>[21]</sup>。

人与机器人交互作用的装置

控制级别	指令装置	报告装置	备 注
I	指令按钮 电位计	电视机 遥测数据指示器	
II	给定控制器 给定手柄	电视机 遥测数据指示器 力显示器	
III	目标指示器和 指示显示器	电视机 综合信息显示器	
IV	电传打字机 打字机 直观显示器 语言指令装置	电传打字机 打字机 直观显示器 语言综合器 语言录放装置	以专用语言联系
V	同 IV	同 IV	以自然语言的某些 特定语句联系

机器人与人联系要有共同语言,机器人的控制装置(计算机)只懂得由人给它规定的语言(机器语言),这种机器人语言的信息由穿孔卡片、纸带或键盘打出去的符号输给机器人,而机器人控制装置输给人的信息是图像、文字及符号等。要使人与机器人之间交换信息更为简便,要求能用自然语言编写程序,并能对自然语言进

行分析。现在已有能用英语和人进行简单对话的机器人。

## 第二十三章 机器人语言

### 23.1 语音应答装置

机器人向人报告时,为了发出人能听懂的自然语言,通常用语言综合器和能保存语言信号的磁带、磁盘等专用录放装置<sup>[18~21]</sup>。这种装置如图 23.1 所示<sup>[21]</sup>,它相当于人的嘴。图中磁带纵向分成若干个轨道,其中每个轨道又横向分成许多区域(每个区域间要留有一定间隔)。这样,在每个纵向轨道

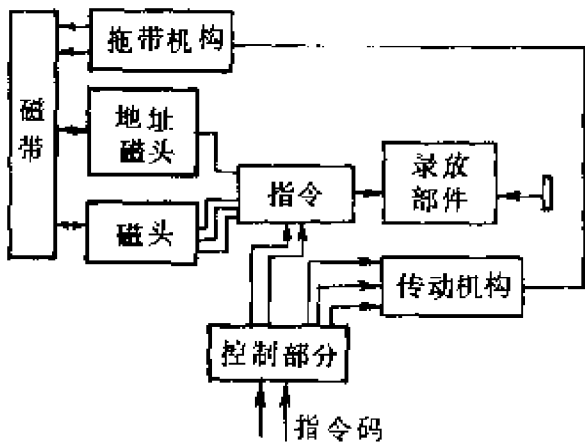


图 23.1 语音应答装置结构图

(除最外边的一条轨道外)的每个区域中可以录入机器人限定使用的一个词语,而在最外边的一个轨道上用数字编码标明各个词语的地址。将磁带卷成一盘,需用某一个词语时,电子计算机将这个词语的地址码送到控制部分。应答装置中拖带机构的传动装置将磁带从一个带圈绕到另一个带圈,读出头便能读出磁带上各个词语的地址码。这些地址码送到控制部分并和要求播放的词语地址码进行比较,如果相同,则控制部分使传动装置将要说的那个词语播放出来。

## 23.2 工作的程序化

机器人的一个重要特点就是它具有通用性。而为了使它具有通用性,就必须使它具有有一种可编程序的机构,改变其程序便能实现不同的作业。把教会机器人的工作叫程序化,其方法有教学放音式、脱机数据程序化和机器人语言程序化三种<sup>[18,19]</sup>。

教学放音方式,使用叫做教学箱的操作箱,把机器人移动到希望的位置和姿态,读取这时机器人各关节的目标数据并记忆下来。若把作好的目标数据序列按顺序给机器人,则教过的动作就会重现。因为边移动机器人边示教,故不要高深的预备知识。但是,由许多示教点形成的复杂工作要准确地程序化,既费事又费时,效率不太高。该方法适合单纯的重复工作,是在现场使用的方法,已广泛使用。

为了克服上述缺点,可以使用计算机辅助设计(CAD)软件设计数据,计算出为了完成某一作业机器人手爪应该运动的位置和所处的姿态,即用CAD的方法产生用于示教的数据,这就是脱机数据程序化。对于一些复杂的作业,或需要给出连续的数据时,采用此方法是比较合适的。

第三种方式是使用编程语言,即机器人语言的方式,机器人语言是一种专用语言,即用符号来描述机器人的动作,类似于计算机的程序设计语言。这种方式的优点很多:(1)由于用计算机代替了手动示教,提高了编程效率;(2)语言编程与机器人型号无关,编好的程序可供多台机器人或不同型号的机器人使用;(3)可以接受感觉信息;(4)可以协调多台机器人工作;(5)可以引入逻辑判断、决策、规划功能以及人工智能的其他方法。

显然,智能机器人的研究离不开机器人语言的研究<sup>[19]</sup>。



### 23.3 机器人语言的分类

根据作业描述水平的高低,机器人语言通常分为三级<sup>[19]</sup>:(1)动作水平级;(2)对象物水平级;(3)作业目标水平级(也称任务级)。动作水平级的语言是以机械手的运动作为作业描述的中心,由使手爪从一个位置到另一个位置的一系列命令组成。对象物水平级的语言以部件之间的相互关系为中心描述作业,与机器人的动作无关。作业目标水平级的语言则以作业的最终目标状态和机器人动作的一般规则的形式描述作业。

上述分类办法较好地反映了语言的水平和功能,但在级与级之间还有些模糊或混乱,所以又有另一种分为五级的办法:(1)操作水平级;(2)原始动作水平级;(3)结构性动作水平级;(4)对象物状态水平级;(5)作业目标水平级。

操作水平级语言简单,为了使机器人动作,设立了一些基本命令,解释程序对命令进行解释执行。它没有一般程序设计语言那样多的文法和句法,水平与汇编语言相当。例如 IBM 公司初期制作的 MI 语言。它由两部分构成,一部分是为了完成机器人的基本动作和系统的操作而设置的子程序包;另一部分是可用带参数的命令起动那些子程序的解释程序。机器人系统构成时都配备了这一水平级语言,而且许多系统没有给这类语言命名。

原始动作水平级语言对于动作的描述仅限于手爪,动作的目的是移动某一物体,基本语句形式为

MOVE TO <destination>

这一级语言的代表是 VAL 语言,它的句子结构比较简单,易于编程,语法类似于 BASIC。

结构性动作水平级语言是在常用的程序语言的基础上加了有关机器人控制的句子结构,同时为了描述三维环境,语言中设立了各种数据及其相互运算的关系式。动作语句形式一般为:

MOVE (object) TO (destination)

AL 语言,以及后来把 AL 与 LISP 结合而成的 AL/L,还有 IBM 开发的 AML 都属于结构性动作水平级语言。

原始动作水平级语言和结构性动作水平级语言都以描述动作为中心。其核心是机器人手爪的各种运动语句也可附加其他要求,如运动速度、运动各点之间的衔接等,这类语言还可接受感觉信号。

对象物状态水平级语言是按照对象物之间的状态变化进行程序设计,即以描述部件之间关系为中心的语言。用户仅给出相应的任务,不用给出明确的动作序列,至于如何去完成任务,则由系统根据环境和作业的描述进行规划,自动生成相应的动作序列。这种语言都有处理感觉信息的能力,可利用感觉信息修改和更新环境的描述和环境模型,也可利用感觉信息进行控制、测试和监督。属于这一类的语言有 AUTOPASS,它带有自然语言的特色,LAMA 用 LISP 语言写成,还有 RAPT、ROBEX 等。

作业目标水平级语言则以作业的最终目标描述作业,为达到此目标而自动生成详细的动作、顺序和相应数据。这是一种最理想的机器人语言,必须依靠较好的问题求解方法才能得以实现。这类语言具有判断环境、描述环境的能力,也有规划任务的能力,它与人工智能的研究密切相关。这类语言有 MICROPLANNER、CONNIVER、PROLOG 等。前两种语言用 LISP 写成,可进行动作序列的规划,机器内部具有模式匹配和追踪功能。为从初始状态到达目标状态,系统首先生成一系列子目标。以后的运行过程就与对象物状态水平的机器人语言相同。

## 23.4 VAL 语言

VAL 语言的主要特征:(1)能够在线、实时使用;(2)设有坐标变换的子程序,机器人的坐标可用直角坐标系定义;(3)对机器

人动作顺序编制程序时,其中的定位参数必须给出实际的数据;  
(4)可利用外部存储器(软盘)记忆程序和数据。VAL 语言的硬件支持系统如图 23.2 所示<sup>[19]</sup>。

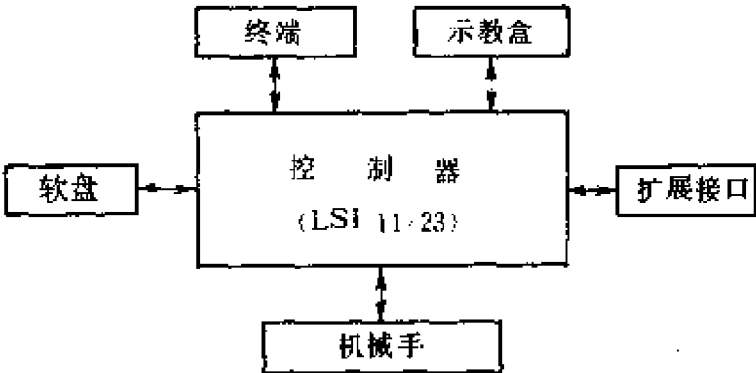


图 23.2 VAL 的硬件支持系统

VAL 的语言系统框图如图 23.3 所示<sup>[19]</sup>,其中各主要组成部分如下:

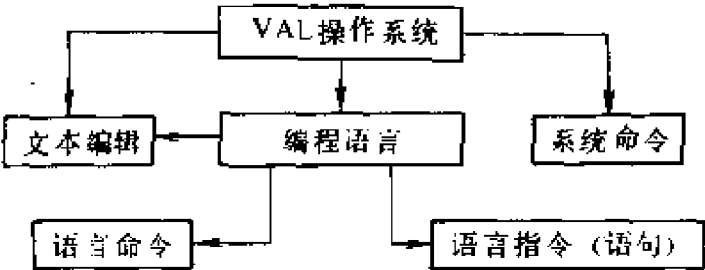


图 23.3 VAL 系统框图

(1)编辑:在编辑状态(ED<程序名> )下可用终端键盘输入文本程序,也可通过示教盒按示教方式输入程序。编辑过程包括对程序文件的生成和修改。编辑完的文件随即存储在内存,也可使用存盘命令(STORE<文件名>= <程序名> )存入软盘,需要时还可以再调入(LOAD<文件名> )。

(2)系统命令:包括位置定义、程序和数据列表、程序和数据存储、程序控制、系统状态的设置和控制、系统开关控制、系统诊断和修改等。

(3)编程语言:语言指令由一条条语句组成,在运行命令(EX-ECUTE<程序名> )发出后,指令被逐条执行。在执行程序的同时,系统可进行命令控制,也可进行程序编辑。

### 23.4.1 VAL 的命令和指令简介<sup>[19]</sup>

VAL 的命令和指令大致可分为三类:动作控制;程序控制和各种运算;坐标设置。下面简单介绍它们的功能。

(1) 决定机械手位置的控制功能,其中包括:PTP 控制(Point To Point control,或 sequential positioning control),即在运动的路径上指定有限个必须通过的点;CP 控制(Continuous Path control),即整个运动路径都由插补点决定;两点之间为直线轨迹的 CP 控制;从某一点开始,手指姿态一定的直线移动;从某一点开始,手指按原来的方向移动;移动时间一定的单坐标轴 PTP 控制。

(2) 用示教盒进行的手动控制定位功能,其中包括:绕各个关节轴的单独转动;在基坐标系(WORLD)中,沿  $x, y, z$  三轴的平移,以及围绕三轴的转动;在工具坐标系(TOOL)中,沿  $x, y, z$  三轴的平移,以及围绕三轴的转动;处于自由状态(FREE),整个机械手的位置和姿态可任凭操作者随意摆布。

(3) 速度控制功能,其中包括:在手动控制时,用示教盒上的开关旋钮设定速度;在程序执行时,通过命令设定各程序步骤的速度(按标准速度的 0~100% 设定)。

(4) 位置精度的控制功能,其中包括:各轴完全达到最终目标位置时,才转到下一步骤;各轴在一定误差范围内达到最终目标位置时,转到下一步骤;与各轴偏差无关,插补指令值达到最终目标时,就进入下一步骤;希望达到一定的轨迹精度时,可以使用偏差积分补偿。

(5) 程序设计功能,其中包括:无条件转移、逻辑转移语句以及根据外部信号决定的条件转移语句;可使用多达十次的子程序嵌套调用;有中断功能;有暂停、继续执行功能;有对整型变量进行加、减、乘、除、求余数等五种算术运算功能。

(6) 程序的编辑功能,其中包括:删去或插入一步或多步指

令;修改指令文字;修改位置数据;给指令内容加注释。

(7) 位置数据的定义(输入)方法。必要的位置已在程序设计时作为位置变量给以文字命名,其实际数值可通过下述两种方法设置:用键盘键入机械手在基坐标系中各个轴的位置和姿态,及机械手各关节轴的位置;用示教盒手动引导,确定机械手在基坐标系的位置和姿态。

(8) 复合坐标变换功能。若机械手的位置、姿态数据用  $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  的  $3 \times 3$  矩阵表示,可以定义一个坐标变换,这样,当一个坐标系进行相对的位置变化后,所形成的新坐标系可用原坐标系与坐标变换的积来计算。因此,若机器人与任意作业空间的相对位置发生变化,只要变更作业空间的定位数据,程序中所有的定位数据就可原样使用。此外,不管选用什么形状、尺寸的手爪,都可方便地参考工具坐标系定义手爪坐标系。

(9) 接近点和退避点的自动生成功能,例如

APPRO <loc> <dist>

表示手爪从当前位置以关节插补方式移到与目标点<loc>在  $z$  方向相隔一定距离<dist>处;

APPROS <loc> <dist>含意同 APPRO 指令,但手爪的移动方式为直线运动;

DEPART <dist>

表示手爪从当前位置以关节插补形式在  $z$  方向上移动一段距离<dist>;

DEPARTS <dist>

含意同 DEPART,但移动方式为直线运动。

(10) 软盘文件编辑功能,其中包括:把程序和位置数据读出和存入软盘;软盘初始化;文件压缩和删除等。

(11) 手指的控制功能,其中包括:用 OPEN 和 CLOSE 语句控制手指的开闭,也可随动作语句一起执行;手指的开度控制;确认手指抓住物体以后,进行条件转移。

下面列出 VAL 的主要语句结构。

动作语句：

MOVE <loc>

MOVES <loc>

MOVET <loc> <opening>

MOVEST <loc> <opening>

APPRO <loc> [!] <dist>

APPROS <loc> [!] <dist>

DEPART <dist>

DEPARTS <dist>

DEAW [<dx>] [<dy>] [<dz>] {在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上运动}

DRIVE <joint> <change> <speed> {某一关节以 <speed> 速度  
转动 <change> 角度}

手指控制语句：

OPEN [<opening>]

OPENI [<opening>]

CLOSE [<opening>]

CLOSEI [<opening>]

GRASP [<opening>] [<label>]

整数运算语句：

SETI (i. var 1) = (i. var 2) [(operation) (i. var 3)]

TYPEI (i. var)

数据语句：

HERE <loc> {把当前的位置赋给定位变量}

TOOL [<trans>]

SET [<trans 1>] = [<trans 2>] {把变量 2 的值赋给变量 1}

SHIFT <trans> BY [<dx>] [<dy>] [<dz>]

INVERSE <trans 1> = <trans 2> {变量 2 为变量 1 的逆}

FRAME <trans 1> = <trans 2> <trans 3> <trans 4>

控制语句：

GOTO <label>

GOSUB <programme> RETURN

IF <i. var> <relationship> <i. var>

THEN <label>

IFSIG <ch> [**<ch>**] [**<ch>**] [**<ch>**]

THEN <label> {测试与外界联系的通道<ch>的信号,当<ch>为高电平时,转向标号为<label>的语句}

SIGNAL <ch> [**<ch>**...<ch>] {设置输出通道的值}

REACT <ch> [**<prog>**] [ALWAYS] {起动指定通道的信号监测器,输入信号符合指定条件时,等待当前执行指令结束,一结束就转入<prog>指定的子程序}

REACTI <ch> [**<prog>**] [ALWAYS] {条件成立时,不等当前指令结束就马上转入<prog>}

WAIT <ch> {进入循环,等待外部条件成立}

IGNORE <ch> [ALWAYS] {关闭已被起动的信号监测器}

控制方式语句:

SPEED <val> [ALWAYS]

COARSE [ALWAYS]

FIND[ALWAYS]

NONULL [ALWAYS]

NULL [ALWAYS]

INTON [ALWAYS]

INTOFF [ALWAYS]

#### 23.4.2 VAL 程序设计举例<sup>[19]</sup>

例 23.1 机械手到 PICK 点抓住物体,放到 PLACE 的位置上去。

程序名:DEMO.

程序编辑:

- EDIT DEMO<sub>1</sub> ( \_\_ 表示用键盘输入的部分)
- PROGRAM DEMO<sub>1</sub>

1. ? OPEN {打开手指}
2. ? APPRO PICK 50 {向 PICK 的接近点 50mm 处移动}
3. ? SPEED 30 {下面的速度为 30%}
4. ? MOVE PICK {向 PICK 点移动}
5. ? CLOSEI {手指闭合抓住物体,“I”表示闭合完毕以后才转入下一步}
6. ? DEPART 70 {离开 PICK 点 70mm}
7. ? APPROX PLACE 75 {以直线轨迹方式向 PLACE 的接近点 75mm 处移动}
8. ? SPEED 20 {下面的速度为 20%}
9. ? MOVES PLACE {以直线轨迹方式移动到 PLACE 点}
10. ? OPENI {打开手指,“I”表示打开終了以后才转入下一步}
11. ? DEPART 50 {离开 PLACE 点 50mm}
12. ? E {编辑结束}

程序中定位数据的给定(用示教盒手动引导):

• HERE PLACE

x/JT1    y/JT2    z/JT3    o/JT4    a/JT5    t/JT6  
225.66   618.84   -131.94   154.86   89.187   -131.347

CHANGE ? {问数据是否要变更}

程序的执行:

• SPEED 30 {为了试验程序是否合适,所以程序用 30 %的速度进行}

• EXEC DEMO, 3 {三次执行 DEMO1 程序}

• STATUS {为了监视程序执行,显示机械手状态}

•  
•  
•

PROGRAM COMPLETED

HALTED AT STEP 12 {程序执行完毕,终止在第 12 步}

• EXEC -10 {用负数表示无限止地执行 DEMO1 程序,默认程序名与前一次相同}

例 23.2 使用机械手整齐排列桌上的十个零件。

• 360 •



程序清单:

```
      SETI N.PARTS=0
100 VPICTURE
      VLOCATE PART 100
      APPRO CAMERA:PART;PICK VP 50
      MOVES CAMERA:PART;PICK VP
      GRASP 25
      DEPART 50
      APPRO PALLET 50
      MOVES PALLET
      OPENI
      SHIFT PALLET BY 5.2 25 4.0
      SETI N.PARTS=N.PARTS+1
      IF N.PARTS NE 10 THEN 100
      STOP
```

## 23.5 AL 语言

AL 语言能控制多台具有感觉信号的机器人,它的硬件支持系统如图 23.4 所示。

图 23.5 说明 AL 的软件系统及其运行过程。用户写的源程序 FOO.AL 送交分析程序分析,若无错误就生成一个 FOO.SEX 文件(中间码文件)送交编辑程序,若有错误就输出一个带有错误信息的文件 FOO.ERR 和一个拷贝文件 FOO.AL。

编辑程序对 FOO.SEX 进行编辑并进行模拟和轨迹

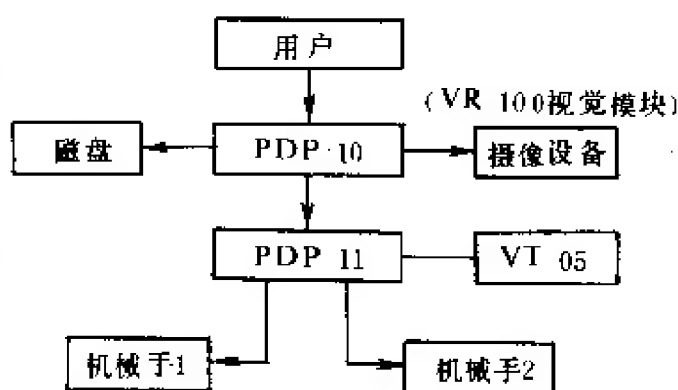


图 23.4 AL 的硬件支持系统

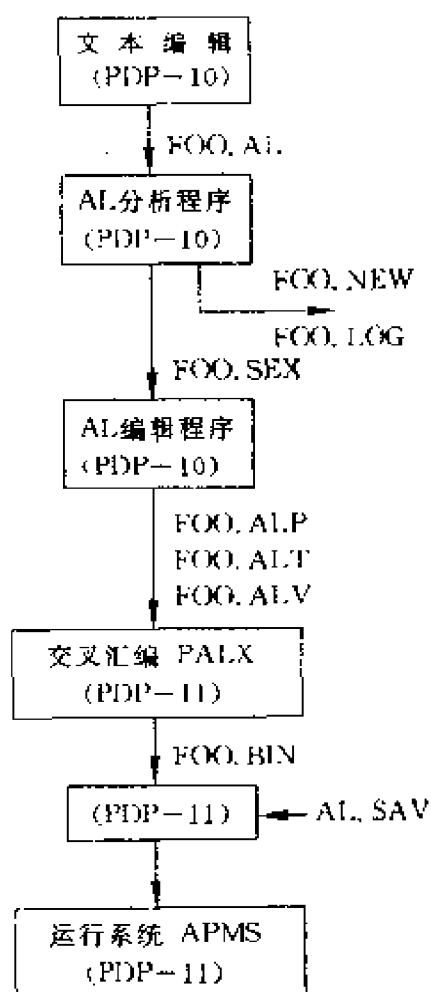


图 23.5 AL 的软件系统

计算,最后生成三个类型的文件 ALP、ALT、ALV,它们包括了程序码、常数和运动轨迹,然后送交叉汇编 PALX,生成 FOO, BIN 二进制文件。FOO, BIN 连同 AL, SAV(程序码编辑程序)送交 PDP-11,最后产生执行文件。

AL 类似 ALGOL 语言,每个变量需事先说明,且也是一种块结构语

### 23.5.1 变量的表示和类型<sup>[19]</sup>

变量由一串英文字母、数字和下划线符号“\_”构成。例如:pump base, handle, screw hole 2 等。所有的变量都必须由英文字母打头,大小写具有同等意义。

变量可以用赋值语句进行赋值,变量与数值用“←”来连接,即把箭头

右边的数值赋给左边的变量。下面分别介绍几种重要的变量类型。

(1)基本变量 AL 中最基本的数据类型为 SCALAR。对于此种类型的变量可进行五种运算,加(+)、减(-)、乘(\*)、除(/)、指数(↑)。可使用函数 SQRT、SIN、COS、TAN、ASIN、ACOS、ATAN,自然对数 LOG 和指数变换 EXP 等。例如

SCALAR s <sub>1</sub> s <sub>2</sub> ;	{变量类型说明}
s <sub>1</sub> ← 2;	{赋值}
s <sub>2</sub> ← 3.50;	{赋值}
s <sub>1</sub> ← s <sub>2</sub> * (s <sub>1</sub> - 3.2)。	{s <sub>1</sub> 的值为 -1.2}

SCALAR 型变量可表示时间 (TIME)、距离 (DISTANCE)、角

度(ANGLE)、力(FORCE)或者它们的组合。AL 还能处理这些变量的量纲,即秒(sec)、英寸(inch)、度(deg)或盎司(ounce)等。具有量纲的变量进行加、减、乘、除以后,其结果是否具有合适的量纲要进行检查。例如

```

SCALAR s1 s2;
DISTANCE SCALAR ds1;
TIME SCALAR tm1 tm2;
FORCE SCALAR fs1;
ANGLE SCALAR theta phi;
ds1 ← 1.0 * inch;
tm1 ← 3 * sec;
fs1 ← 2.2 * ounce;
tm2 ← tm1 + 4.5 * sec;
theta ← 90 * deg;
phi ← theta * 4 * deg; {右边单位为 deg2, 单位量纲有错}
s1 ← SIN(30 * deg);
theta ← ACOS(0.7);
ds1 ← SQRT(ds1 * 3 * inch);
phi ← ATAN(s1/s2);
s1 ← LOG(33.0);
s2 ← s1 ↑ 3;

```

速度、角速度、力矩定义基本单位,加速度这样的单位不包含在基本单位内,必须作如下说明:

```

DEFINE feet = C(12 * inches) D; {英尺的定义}

```

DIMENSION acceleration = VELOCITE/TIME; { 加速度单位的定义}

```

acceleration SCALAR as1;
as1 ← 6.7 * feet/(sec * sec);

```

AL 语言中有几个事先定义过的 SCALAR,例如:

```

SCALAR pi; {pi = 3.14159}

```

```

DISTANCE SCALAR bhand yhand; { bhand 表示“蓝臂”,yhand

```

表示“黄臂”}

## (2) 向量

VECTOR xhat yhat zhat nilvect; {向量说明}

xhat ← VECTOR (1, 0, 0); {向量赋值}

yhat ← VECTOR (0, 1, 0);

zhat ← VECTOR (0, 0, 1);

nilvect ← VECTOR (0, 0, 0);

下面举例说明向量的使用和运算:

VECTOR v;

DISTANCE VECTOR dv<sub>1</sub> dv<sub>2</sub>;

DISTANCE SCALAR ds;

v ← VECTOR (2, 1, 3);

dv<sub>1</sub> ← VECTOR (4 \* inch, 2 \* inch, b \* inch);

dv<sub>2</sub> ← VECTOR (3, 0, 4) \* inch;

ds ← |dv<sub>2</sub>|; {ds = 5 inch}

v ← UNIT(v); {v = VECTOR(2/3, 1/3, 2/3)}

(3) 旋转 旋转(ROT)型变量用来描述围绕某一个轴的旋转,以表示姿态。任一旋转变量可表示为 ROT 函数,它有两个参数,一个对应旋转轴,用向量来表示;另一个是旋转角度。旋转规定按右手法则进行。此外,对于旋转 x,函数 AXIS(x)表示求取 x 的旋转轴,而 |x| 则表示取 x 的旋转角。例如

ROT r<sub>1</sub> r<sub>2</sub> r<sub>3</sub> r<sub>4</sub>; {旋转变量说明}

ANGLE SCALAR alpha beta gamma;

VECTOR v;

r<sub>1</sub> ← ROT (xhat, 90 \* deg); {绕 x 轴转 90°}

v ← r<sub>1</sub> \* zhat; {向量 zhat 旋转 r<sub>1</sub>, 赋值于向量 v, 因而 v = (0, -1, 0)}

r<sub>2</sub> ← ROT (yhat, 45 \* deg);

r<sub>3</sub> ← r<sub>2</sub> \* r<sub>1</sub>; {r<sub>3</sub> 表示 r<sub>1</sub> 先绕 x 轴转 90°, 再绕原来的 y 轴转 45°; 或者可表示 r<sub>1</sub> 先绕 y 轴转 45°, 再绕新的 x 轴转 90°}

v ← AXIS(r<sub>2</sub>); {把 v 赋值为 r<sub>2</sub> 的旋转轴 yhat}

```

alpha ← |r1|; {把 alpha 赋值为 r2 的旋转角, 即 alpha = 45°}
beta ← 15 * deg;
gamma ← 60 * deg;
r1 ← ROT (xhat, alpha);
r2 ← ROT (yhat, beta);
r3 ← ROT (zhat, gamma);
r1 ← r3 * r2 * r1; {r1 表示先绕 x 轴转 alpha 度, 再绕原来的 y 轴转
beta 度, 最后绕 z 轴转 gamma 度; 或表示依次绕 z 轴、新的 y 轴、新的 x 轴转
gamma 度, beta 度和 alpha 度}

```

(4)坐标系 FRAME 型坐标系变量用来描述作业空间中物体的姿态和位置, 变量的值表示对象物体的固定坐标系与作业空间坐标系之间的相对位置关系和姿态关系。FRAME 型变量有两个参数, 即旋转和向量。函数 ORIENT、POS 可分别用来定义 FRAME 坐标系的姿态和位置。

对于在某一个坐标系中描述的向量, 可以用“向量 WRT 坐标系”的形式来表示(WRT: With Respect To)。例如

```

FRAME f1 f2; {坐标系变量说明}
f1 ← FRAME(ROT(zhat, 90 * deg), 2 * xhat * inch); {坐标系 f1 的
原点位于基坐标系的 x 轴方向上 2in 处, 它是围绕基坐标系的 z 轴旋转 90°
而形成的坐标系}
v1 ← xhat WRT f1; {v1 被赋值为基坐标系中表示的 f1 的 x 轴的单位
向量, 即(2, 1, 0)}
f2 ← f1 + v1 * inch; {f2 的原点位于(2, 1, 0)姿态与 f1 相同}

```

(5)变换 TRANS 型变量用来进行坐标变换。它和 FRAME 一样具有旋转和向量两个参数, 在执行时, 先相对于作业空间的基坐标系旋转, 然后进行平移操作。

TRANS 的旋转参数和向量参数具有不相同的单位, 后者具有距离的量纲, 所以在进行乘法运算时, 首先对旋转参数进行乘法运算, 然后对向量参数进行加法运算。

两个坐标系用符号“→”相连接时, 意指使左边坐标系的原点

和各轴经过平移和旋转,与右边坐标系的原点和各轴完全重合。例如

```
TRANS t1 t2 t3 t4; {变换型变量说明}
t1←TRANS (ROT(xhat, 30 * deg), 2 * zhat * inch); {绕 x 轴旋转
30°,然后再沿 z 轴平移 2in}
v1←t1 * yhat * inch; {y 轴经过 t1 变换后赋予 v1}
t2←f1←f2; {f1×t2=f2}
v2←t2 * (xhat * inch); {v2为 t2中描述的 t2的 x 轴}
t3←t2 * t1; {变换的积}
t4←INV(t1); {t1的逆变换}
```

### 23.5.2 主要语句命令及有关功能<sup>[19]</sup>

AL 程序一般包含了描述机械手应执行作业的一连串语句,各语句之间用“;”分隔,开始和结尾以 BEGIN 和 END 为标记,例如

```
BEGIN
s1;
s2;
.
.
.
sn;
END
```

其中 s<sub>1</sub>, ..., s<sub>n</sub> 为各种语句,也可以是一些程序块。

(1) MOVE 语句 MOVE 语句用来表示机械手由起始位置和姿态到目标位置和姿态的运动。例如

```
MOVE <hand> TO <destination> VIA f1 f2 f3;
```

表示把某个机械手<hand>经过中间点 f<sub>1</sub>、f<sub>2</sub>、f<sub>3</sub>移动到目标坐标系<destination>。

```
MOVE <hand> TO <block> WITH APPROACH=3 * zhat *
```

inch;表示把〈hand〉移动到在 z 轴方向上离〈block〉3in 的地方,若用 DEPARTURE 代替 APPROACH,则表示离开〈block〉。

MOVE 〈hand〉 TO 〈hand〉 \* FRAME(ROT(zhat, 90 \* deg), nilvect \* inch) ON TORQUE (zhat)  $\geq 50$  \* ounce \* inch DO STOP 〈hand〉;

句中 ON ...DO...为条件语句,整个句子表示〈hand〉绕 z 轴转 90° 而位置不变(nilvect \* inch),动作过程中若力矩超过 50 ounce \* inch 则停止。

(2)手爪控制语句 机械手一般具有两个手指,使用 OPEN、CLOSE 两个语句来控制其开闭,对于开度可控的手指,还可以在语句中说明手指的开度。语句的一般形式为

OPEN 〈hand〉 TO 〈scalar-exp〉;

CLOSE 〈hand〉 TO 〈scalar-exp〉;

其中〈scalar-exp〉是表示开度距离的 scalar 变量值,可事先定义,如 2.5 \* inch。

执行 OPEN、CLOSE 时,两个手指以同一速度动作。对于手指内侧设有触觉的情况,若手指在达到关闭量之前,触觉传感器已处于“ON”的状态,则停止动作,并作出误差信号。

CENTER 语句是使手指闭合到与被抓对象接触为止,即只要有任何一个手指的接触传感器达到“ON”状态就停止动作。一个指头的触觉达到“ON”时,就在保持其状态的前提下使整个手腕移动,直到第二个指头的触觉达到“ON”为止。CENTER 命令并非一定把对象物夹持在手爪的中央,而是要使对象物不能活动,确实把持物体。在 CENTER 命令中把腕的名称作为自变量,例如 CENTER 〈arm〉。

(3)中间点语句 中间点语句有三种。其中接近语句为

WITH APPROACH = 〈appr〉;

其中〈appr〉为目标点所设定的坐标系中的一个向量。语句表示机械手必须经过由〈appr〉所规定的接近点再移动某个目标点。

退避语句为

WITH DEPARTURE= $\langle \text{depr} \rangle$

类似于接近语句, $\langle \text{depr} \rangle$ 表示退离目标点必须经过的位置。

如果没有给出 $\langle \text{appr} \rangle$ 的值,接近点就被默认为在基坐标系  $z$  轴方向  $3\text{in}$  处;而在没有指定 $\langle \text{depr} \rangle$ 的情况下,则沿用前面所进行的运动的接近点作为默认值。语句

WITH DEPARTURE=NILDEPROACH

表示不设退避点,则从当前的位置,直接使腕离开。同样,语句

WITH APPROACH=NILDEPROACH

表示不设置接近点,将腕直接移动到目标点。

VIA 语句用于回避障碍物,从而必须经过某些指定点的情况。

上述三种中间点语句实际上都与 MOVE 语句合并使用。下面的例子是要机械手把一块砖头拿起来,并把它放到与作业台同一高度的烤炉里去的程序,机械手必须通过烤炉的入口而进行移动。

BEGIN

FRAME brick, oven oven-door;

brick $\leftarrow$ FRAME (ROT (yhat,  $90 * \text{deg}$ ), VECTOR (10, 30, 3) \* inch); {规定砖的起始位置和姿态}

oven $\leftarrow$ FRAME (ROT (yhat,  $90 * \text{deg}$ ), VECTOR (10, 40, 3) \* in-ch); {规定砖的终止位置和姿态}

oven-door $\leftarrow$ FRAME (ROT (yhat,  $90 * \text{deg}$ ), VECTOR (15, 40, 4) \* inch); {规定烤炉入口位置和姿态}

OPEN bhand TO  $3 * \text{inch}$ ; {保证手爪开度足够大}

MOVE bhand TO brick;

WITH APPROACH  $3 * \text{zhat} * \text{inch}$ ;

{把机械手向处于水平位置的砖移动,砖的  $z$  轴与基坐标系的  $x$  轴平行}

CLOSE bhand to  $1.7 * \text{inch}$ ; {抓砖};

MOVE barm TO oven VIA oven-door;



```

        WITH APPROACH = -3 * zhat * inch;
{通过烤炉入口把砖移入炉中}
        OPEN bhand TO 3.0 * inch; {放下砖}
        MOVE barm TO bpark VIA oven-door; {机械手移动到待命位置}
    END

```

(4)AFFIX 与 UNFIX 语句 在装配作业中,往往出现把某一个物体“附着”于另一个物体,使二者结合在一起的操作。语句

```
AFFIX pump TO pump_base;
```

执行后,即表明 pump\_base 今后的运动也将引起 pump 作同样的运动,即两者将相伴运动(虽然没有实际连接在一起)。

把操作对象的坐标系“附着”于手腕的坐标系,使二者连接在一起的情况特别重要。如当 pump 与 barm 相伴结合以后,用户就可以考虑手腕,只注意 pump 如何运动、运动到何处。

语句

```
UNFIX pump FROM barm;
```

表示“附着”关系的解除。

(5)力觉的处理 为了完成某个动作,希望使用感觉信息的阈值,此时可在 MOVE 语句中加入条件:

```
ON <condition> DO <action>;
```

例如,机械手的旋转负荷力矩超过 50oz \* in 时,要求停止旋转,对此可采用下列语句:

```
MOVE barm TO barm * FRAME(ROT(zhat, 90 * deg), (nilvect * inch) ON TORQUE (zhat) ≥ 50 ounce * inch DO STOP barm;
```

其中 STOP 是达到某负荷时,机械手的运动停止的一个命令,zhat 是指明力矩检测的方向,50 \* ounce \* inch 是指力矩的阈值。

(6)力的控制与稳定性(抗偏离能力)的控制把力和力矩加到被夹持的物体上,控制其外观上的稳定性,这种功能很有必要,其典型的应用例子就是把销钉插入孔中的作业。

稳定性控制,首先是设定所移动物体的轨迹,然后保持手腕具有一定的稳定性,按规定的轨迹移动。

插入销钉例子的程序如下：

{假定销钉已在手爪中,且两者已经相伴结合}

```
BEGIN
  MOVE peg TO hole_entrance;
  MOVE peg TO hole_bottom;
  DIRECTLY
    WITH STIFFNESS=(VECTOR(10,10,90) * oz/inch,
      VECTOR(200, 200, 200) * oz * inch/radius);
    WITH duration = 2 * sec;
  END
```

在上例中,x、y 方向的稳定性比较低,z 轴方向的稳定性比较高,即旋转轴方向的稳定性比较高。若夹持物体的各个主轴方向稳定性都能控制,则用户可按照给定的手指位置,使稳定的中心取任意值。

为了在所希望的方向稳定性好(等于零),则可用 FORCE 或者 TORQUE 语句加上偏置力表示。下面的例子表示在 x 方向在 3s 内把一定的力加上。

```
MOVE bar TO bar 12 * zhat * inch;
DIRECTLY
  WITH STIFFNESS=(VECTOR (0, 90, 90) * oz/inch, VECTOR(200, 200, 200) * oz * inch/radius);
  WITH FORCE (xhat) = 40 * ounce;
  WITH DURATION = 3 * sec;
```

(7) OPERATE 语句 OPERATE 语句用来控制与 AL 系统相连接的各种装置。例如：

```
OPERATE driver
  WITH ANGULAR_VELOCITY = n * rpm (direction);
OPERATE driver
  WITH TORQUE = n * oz * inch (direction);
OPERATE driver
  WITH DURATION = n * sec;
```

前面两句不能同时使用,因为角速度和力矩不可能同时指定。  
<direction>是指旋转方向,必须是顺时针(CLOCKWISE)或者逆时针(COUNTER CLOCKWISE)中的一个。

(8) VAL 控制命令 对于 PUMA 机械手,它虽然可由 AL 系统直接控制,但有时需要与 PUMA 控制装置中的 VAL 语言系统进行信息交换,这时可使用下列命令:

```
VAL ("string",WAIT);
```

```
VAL ("string",NOWAIT);
```

一串信息送往 VAL 时,AL 可一直等待 VAL 执行完毕(WAIT),或者立即执行下一个语句(NOWAIT),这两种情况分别用上面的第一句和第二句表示。

(9)控制语句 AL 中有许多控制语句,与 ALGOL 语言非常相似。如:

```
IF...THEN...ELSE...;
```

```
FOR...loop;
```

```
WHILE...DO loop;
```

```
CASE statement;
```

```
DO...UNTIL...statement;
```

等等,但没有 JUMP 和 GOTO 语句。

(10)并行控制语句 AL 语言可同时控制若干台机械手。使用 COBEGIN...COEND 模块时,模块内的语句是并行执行。例如:

```
COBEGIN
```

```
    MOVE barm TO bpark;
```

```
    MOVE yarm TO ypark;
```

```
    MOVE garm TO gpark;
```

```
    MOVE rarm TO rpark;
```

```
COEND
```

为了使多个机械手同步运动,可使用 EVENT、SIGNAL、WAIT 语句。例如:

```
EVENT c1 c2 c3;
```

EVENT 语句定义事件,并给每个事件一个信号计数器,计数器的初值为零。又如:

```
SIGNAL e1;
```

程序执行时,e<sub>1</sub>计数器的内容加 1,若其结果为零或为负,则允许执行等待这一事件的程序。若遇到

```
WAIT e1;
```

则事件 e<sub>1</sub>的计数器内容减 1,计数器的值变负时,进入等待状态;而计数器的值为零或正时,则继续执行下条语句。

下面是使用这三种语句描述两个机械手交接积木的例子。

```
BEGIN
```

```
    EVENT passed caught ready_pass; {定义事件,使事件计数器为零}
```

```
    FRAME block pass catch; {block 为积木坐标系, pass、catch 表示递交或接受积木时,机械手位置和姿态的坐标系}
```

```
    COBEGIN
```

```
        BEGIN {蓝色机械手递交过程}
```

```
        MOVE barm TO block;
```

```
        CENTER barm;
```

```
        AFFIX block TO barm;
```

```
        MOVE block TO pass; {把积木移到递交处}
```

```
        SIGNAL ready_pass; {准备文件}
```

```
        WAIT caught; {等待另一手接受}
```

```
        OPEN bhand TO 3.0 * inch; {放开积木}
```

```
        UNFIX block FROM barm;
```

```
        SIGNAL passed; {递交完毕}
```

```
    END
```

```
    BEGIN
```

```
        OPEN yhand TO 3 * inch;
```

```
        MOVE yarm TO catch; {向接受积木处移动}
```

```
        WAIT ready_pass; {等待积木到来}
```

```

    CENTER yarm; {抓住积木}
    SIGNAL caught; {表明已抓住}
    WAIT passed; {等待释放}
    MOVE yarm TO plate; {把积木放到盘子里}
    END
COEND

```

(11) PROCEDURE 和 ARRAY 语句 在程序中有时在几个地方执行的是相同的一个作业,为此希望利用了程序的形式,这由 PROCEDURE 语句实现。

例如在装配作业中有几个螺钉要拧进螺孔内,此时可由下列程序实现。

```

PROCEDURE inset_screw(FRAME hole_location)
BEGIN
    screw ← screw_dispenser;
    MOVE driver_tip TO screw;
    AFFIX screw TO driver;
    MOVE driver_tip TO hole_location;
    COBEGIN
        MOVE screw TO  $-0.75 * zhat * inch$ ;
        WITH FORCE =  $20 * ounce$ ;
        ALONG zhat OF screw;
        WITH DURATION =  $2.5 * sec$ ;
        OPERATE driver
            WITH ANGULAR-VELOCITY =  $200 * rpm$ ;
            WITH DURATION =  $3 * sec$ ;
    COEND
    UNFIX screw FROM driver;
END

```

若把这个 PROCEDURE 语句的变量设为 h,那么,上面的程序就表示在位置 h 进行拧螺钉作业。

AL 也能使用数组,例如某个台上有三个孔,分别用 hole

(1)、hole(2)、hole(3)定义其坐标系,也可写成 hole[1:3], 用 FRAME ARRAY hole[1:3]定义。

(12)宏指令 宏指令的使用可简化源程序,例如:

```
DEFINE grasp (object)=
```

```
    ◻MOVE barm TO object; CENTER barm;  
    AFFIX object TO barm RIGIDLY◻
```

其中 grasp 定义为宏指令的名称,object 是参数,可以被更换。

## 第二十四章 机器人的听觉器官

### 24.1 人和机器人听觉器官的类比

#### 24.1.1 人的听觉器官<sup>[21]</sup>

人通过耳听取外界声音。人耳包括外耳、中耳和内耳,如图 24.1 所示。声音经外耳耳道通过鼓膜传送到中耳的听小骨,再通过卵圆窗传到内耳耳蜗,然后通过柯蒂氏器、神经纤维进入大脑。声波由许多不同频率、不同能量的波组成,耳向大脑送入的声音信息包括频率、强度和时间三个特征。

外耳鼓膜接收外界声音,鼓膜产生振动,中耳将这种振动放大、压缩和限幅,并抑制噪音。限幅和抑制噪音相当于人眼睛瞳孔的作用,外界信息太强时,可减小接收量。抑制噪音就是有各种噪音干扰时排除嘈杂声音,只接收所需要的信号。人的语音经送话器产生电压波形的峰值比均方根值高 12~15dB,这说明语音的可听懂性主要取决于辅音。如果将语音的电压信号波形峰值削掉,声音峰值与均方根值之比减小,也就是使得辅音的权(即辅音在声音中的相对分量)增大,这样就提高了声音的可懂性。

内耳耳蜗里充满了液体,其中有许多(约有 30000 个)长度不同的纤维组成的基底膜,它是一个共鸣器。不同长度的纤维能够感受不同频率的声音,所以内耳实际上是一个声音分析器。纤维将基底膜接受声音时产生的振动变成电信号的平均值时,对应的继电器接通。

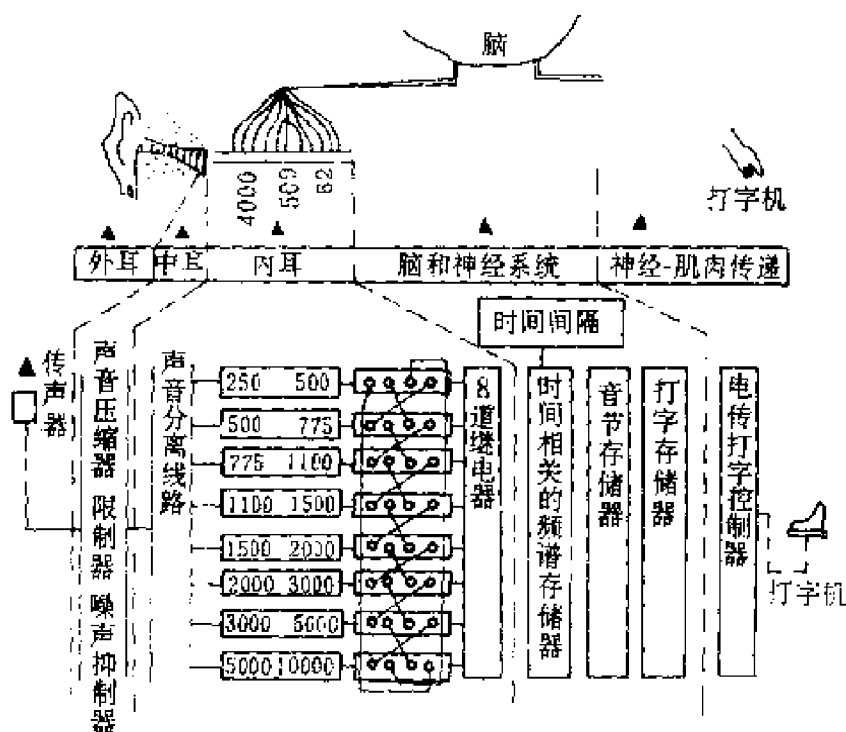


图 24.1 受令打字员和语音打字机系统

### 24.1.2 机器人的听觉器官<sup>[24-26]</sup>

图 24.1 所示语音打字机系统中模仿人耳听觉的传声器相当于人的外耳,限制器和噪音抑制器相当于人的中耳。内耳的机器模型包括有带通滤波器的频率分析器和幅度鉴别器。这里采用 8 个带通滤波器,若太多则实现起来有困难。幅度鉴别器将相邻通道中的信号进行比较,只有通道中的信号大于相邻两通道中的信号,信号才送到脑内。人的语音频率为 300~3000Hz,这种分析器只能区别出 60 个单音,但人的语音的频率、强度和时间特征因人而异,且差异相当大。此外,同一个人在不同情况下语音特征的变化也相当大。

人有双耳不仅能起备份作用,按立体声原理还可以确定发音体的位置和方向。

声音识别是人工智能的一个重要研究课题,也是智能机器人的一个重要研究内容。现在已有能识别 200 多个单字的声音识别



装置(在限定数量单字之内由限定的人员使用)。目前声音识别技术正朝着两个方向发展,一是直接用能谱及音节模型特征识别声音,二是通过将声音能谱等效地转换为声道形状的特征来识别声音。

## 24.2 传 感 器

### 24.2.1 无噪声电声传感器

#### (1)原理

无噪声压电传声器的工作原理如图 24.2 所示。图 24.2(a) 是由两块压电高聚物  $\text{PVF}_2$  薄膜构成的无噪声压电传声器的振膜,图 24.2(b)是受声压作用后振膜的状态,图 24.2(c) 是受机械振动作用后振膜的状态。因声波波长较长,故加在传声器上的声压如图 24.2(b)中的箭头  $P$  所示,即振膜向内侧移动。这时两块振膜都收缩,在振膜表面产生如图 24.2(b)所示的同号电荷,故输出电荷  $2Q$ ,即两块振膜的声压灵敏度是单块振膜的两倍。

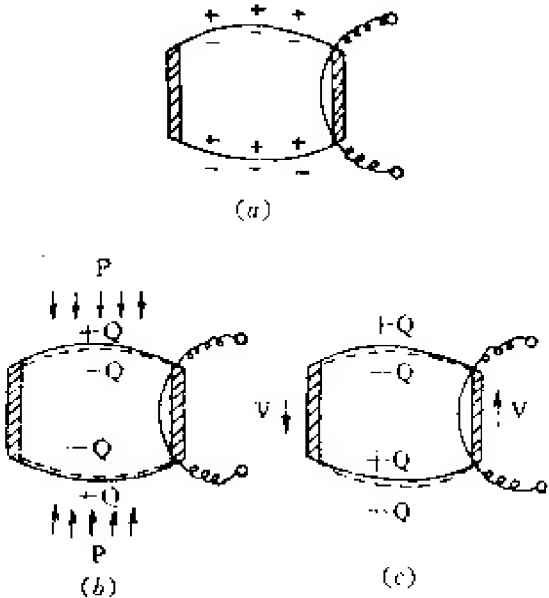


图 24.2 无噪声传声器的工作原理示意图

另外,传声器框体振动使振膜受到如图 24.2(c) 所示的机械振动作用。这时两块振膜向同一方向移动,一块振膜伸长,另一块振膜缩短,所产生的电荷跟图 24.2(b)的符号相反,故输出相抵消,即这时无噪声输出。

## (2)结构

无噪声压电传声器的结构如图 24.3 所示。其中压电高聚物 PVF<sub>2</sub> 振膜对置装入导电机壳中,并在各振膜上设置声孔。

压电高聚物 PVF<sub>2</sub> 单块振膜的结构如图 24.4 所示。传声器的灵敏度  $\frac{e}{P}$  (即外电压  $e$  与声压  $P$  之比)和谐振频率  $f_0$  决定于该振膜的尺寸和性能,即

$$\left| \frac{e}{P} \right| = \frac{Rd}{\epsilon} \times 10^{-1} \left( \frac{V}{\mu Pa} \right) \quad (24.1)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{C^E}{\rho}} \text{ (Hz)}$$

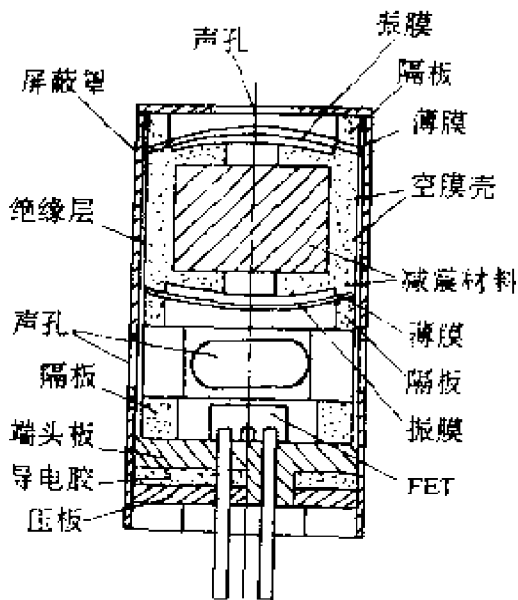


图 24.3 无噪声压电传声器的结构示意图

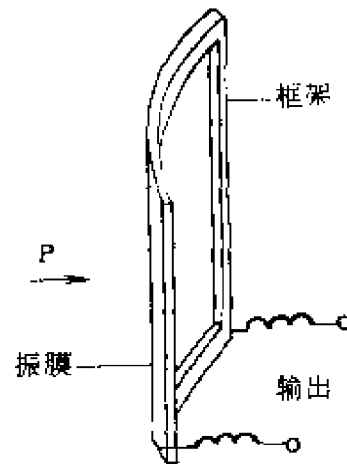


图 24.4 传声器振膜的单块结构示意图

由上式可知,传声器的灵敏度与振膜的曲率半径  $R$  和压电常数  $d$

成正比,与介电常数 $\epsilon$ 成反比。传声器的谐振频率与振膜的曲率半径 $R$ 成反比,并与PVF<sub>2</sub>薄膜的弹性常数 $C^E$ 和密度 $\rho$ 有关。开路电压灵敏度、谐振频率与圆弧角度 $\theta$ 和圆筒长度无关。也就是说,灵敏度和谐振频率与振膜的面积无关。若曲率半径增大,则灵敏度升高而谐振频率下降。

在压电传声器内部装入场效应晶体管(FET),从而实现阻抗变换。

### (3) 性能和应用

无噪声压电传声器的声压灵敏度与谐振频率的关系如图24.5所示。

无噪声压电传声器的抗噪声性能如图24.6所示。图中振动/声压灵敏度比是在1kHz以下测量的,和原来的压电传声器相比,这种传声器改善了耐振性能(20dB以下)。

无噪声压电传声器主要用作磁带录音机的传声器。磁带录音机等机壳的振动一般低于500Hz,若使用无噪声压电传声器,几乎能完全不拾取电机等机械振动。

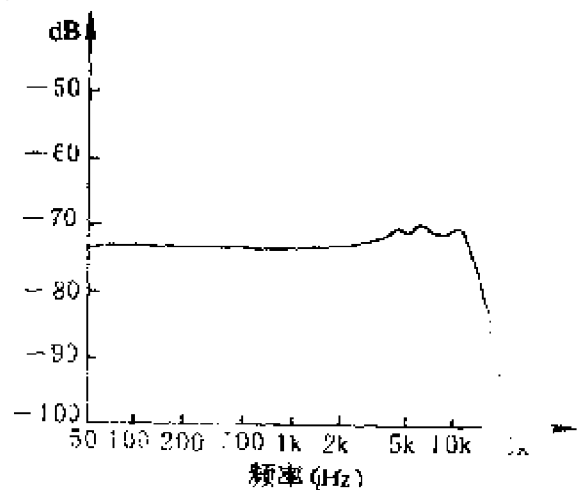


图 24.5 声压灵敏度与谐振频率的关系

## 24.2.2 驻极体电容式传声器<sup>[16]</sup>

驻极体电容式传声器的结构原理如图24.7所示。振膜用高聚物驻极体制作,膜镀上金或铝金属层作一个电极,另一个电极是用金属制成的多孔背极。背极后面是与空气相通的气腔。

驻极体振膜的金属层和背极构成平行板电容器。该电容器中间有驻极体和空气两种介质,故其静态电容量

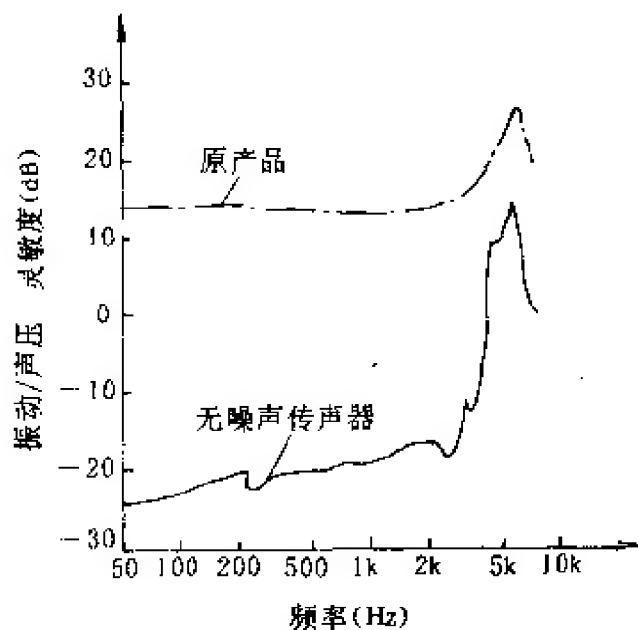


图 24.6 无噪声传声器的耐振效果

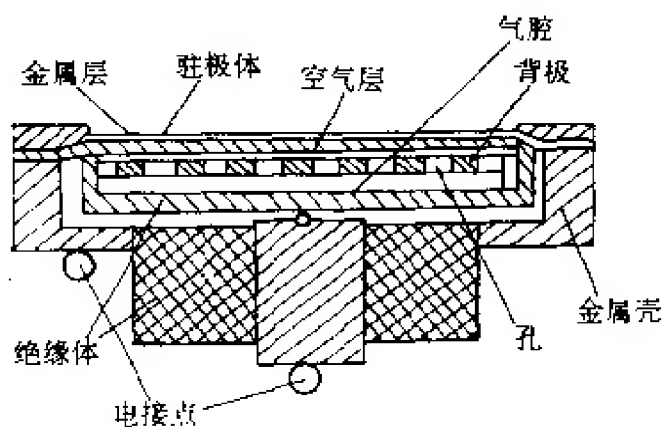


图 24.7 驻极体电容式传声器的结构原理示意图

$$C = \frac{S_0 \epsilon_0}{d + \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} D} \quad (24.2)$$

式中  $S_0$  是极板的有效面积,  $\epsilon_0$  是空气介电系数,  $\epsilon_r$  是驻极体的相对介电系数,  $d$  是空气层的厚度,  $D$  是驻极体薄膜厚度。由式 (24.2) 可知, 中间有两种介质的上述电容器可等效为面积为  $S_0$  和板间距离为  $x_0 = d + \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} D$  的空气平板电容器,  $x_0$  称静态板间等效

距离。由于驻极体的永久电极化,驻极体有表面电压

$$U_0 = \frac{\sigma D}{\epsilon_r} \quad (24.3)$$

该电压称驻极体电容式传声器自给极化电压。

由图 24.7 可作出驻极体电容式传声器的等效电路,这种等效电路如图 24.8 所示。图中  $M_{ma}$  是振膜声质量,  $C_{ma}$  是振膜声顺,  $R_{a1}$  是空气薄层的声阻,  $M_{a1}$  是孔的声质量,  $C_{a1}$  是气膜的声顺。

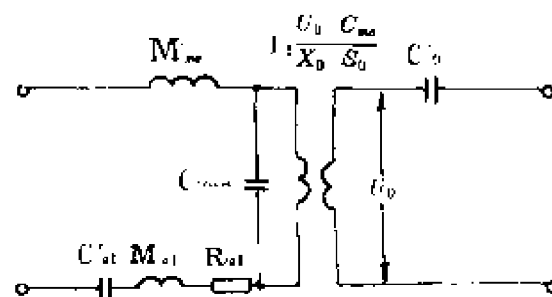


图 24.8 驻极体电容式传声器的等效电路

由图 24.8 可得驻极体的膜体积速度

$$\dot{U} = \frac{\dot{P}}{R_{a1} + j \left[ \omega(M_{a1} + M_{ma}) - \frac{1}{\omega} \left( \frac{1}{C_{ma}} + \frac{1}{C_{a1}} \right) \right]} \quad (24.4)$$

在一般情况下,  $C_{ma} \gg C_{a1}$ ,  $M_{ma} \gg M_{a1}$ , 所以, 上式可简化为

$$\dot{U} = \frac{\dot{P}}{R_{a1} + j \left( \omega M_{ma} - \frac{1}{\omega C_{a1}} \right)}$$

由此可得系统共振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_{ma} C_{a1}}}$$

系统采用力顺控制时, 在  $f \ll f_0$  范围内, 式(24.4)可简化为

$$\dot{U} = j\omega C_{a1} \dot{P}$$

由图 24.8 可得传声器开路电压

$$|U_0| = \frac{U_0}{\omega x_0 s_0} \dot{U} = \frac{U_0}{x_0 s_0} C_{a1} |\dot{P}|$$

将自给极化电压  $U_0$  和等效板间距离  $x_0$  用结构参数及材料参数表示, 上式可表为

$$|U_o| = \frac{D\sigma_s C_{a1}}{S_0(\epsilon_s d + \epsilon_0 D)} \cdot |P|$$

因此,驻极体电容传声器开路灵敏度

$$\left| \frac{U_o}{P} \right| = \frac{D\sigma_s}{S_0(\epsilon_s d + \epsilon_0 D)} C_{a1}$$

设驻极体传声器所有气腔的净容积为  $V_0$ , 由于

$$C_{a1} = \frac{V_0}{\gamma P_0} = \frac{S_0 L_0}{\gamma P_0}$$

则开路灵敏度

$$\left| \frac{U_o}{P} \right| = \frac{D\sigma_s L_0}{(\epsilon_s d + \epsilon_0 D) \gamma P_0} \quad (24.5)$$

式中,  $L_0$  为背极后空腔等效厚度,  $\gamma$  为空气的比热比,  $P_0$  为静态大气压强, 其他符号同前述。

式(24.5)表明,驻极体电容式传声器开路灵敏度与振膜有效面积  $S_0$  无关,故可设计小型驻极体电容式传声器。

### 24.2.3 动圈式传声器<sup>[14]</sup>

动圈式传声器的结构原理如图 24.9 所示,线圈贴于振膜上,并悬于两磁极之间,声波通过空气使振膜振动,从而导致线圈在两

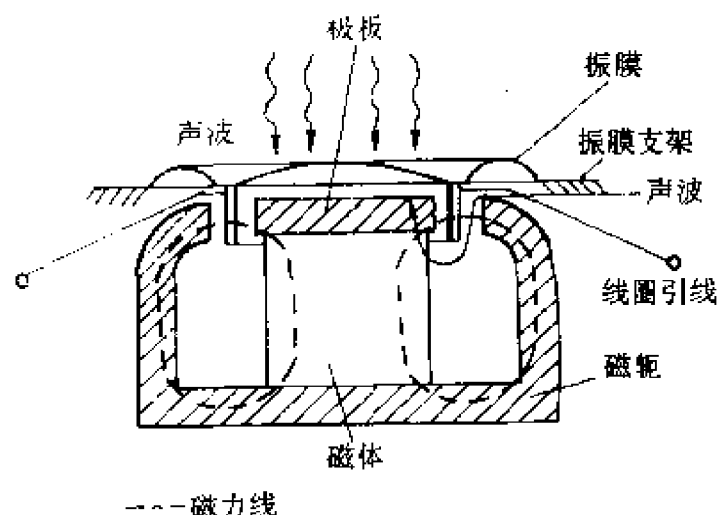


图 24.9 动圈式传声器的结构原理示意图

磁铁间运动。线圈切割磁力线时,在线圈中产生微弱的感应电流,该电流与声波直接相关,可以说是声波的电“图像”。该“图像”经调音台(或放大器)进行调整,然后通过放大器和扬声器再还原成声音。

如图 24.10 所示,上述动圈式传声器,声压仅作用在振膜的一面上,振膜的另一面被隔声壳体挡住。因此,动圈式传声器能同等地拾取来自各个方向的声音。

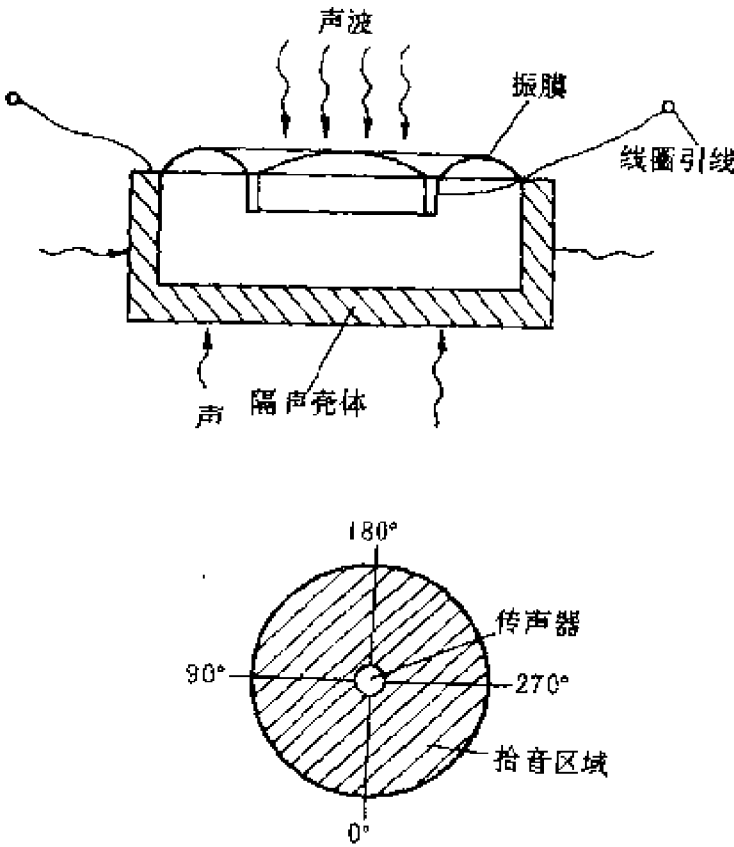


图 24.10 动圈式传声器的全面响应示意图

#### 24.2.4 带式传声器<sup>[14]</sup>

产生电压不一定要移动整个线圈,只要移动一段线也可产生电压。带式传声器不是靠线圈产生电压,而是使用一条金属带。金属带在强磁铁的两极间自由运动,从而对声音的振动作出迅速反应,产生与声振直接相关的电压。带式传声器的金属带尺寸小,故

产生的电压也很低,因此,需要使用一个变压器。

## 24.3 拾音器

### 24.3.1 电磁拾音器

电磁拾音器有动磁式、磁感应式、动铁式和可变磁阻式等类型,图 24.11 示出可变磁阻式的结构原理示意图。在永久磁铁的极靴之间置一衔铁(即振动子),唱针固定在衔铁上,衔铁与极靴之间用弹性垫(橡皮阻尼器)隔开。放唱片时,唱针左右摆动,从而改变衔铁与极靴间的距离,致使磁路磁阻改变。唱针摆向右边时,右上方和左下方的空隙增大,磁阻增加,而右下方和左上方的空隙减小,磁阻降低。因此,磁通经左上端和右下端穿过衔铁形成闭路,如图 24.11(c)所示。反之,唱针摆向左边时,右上方和左下方的空隙减小而右下方和左上方的空隙增大,磁通经左下端和右上端穿过衔铁形成如图 24.11(b)所示的闭路。唱针左右摆动时,经过衔铁的磁通在线圈中产生交变电动势。

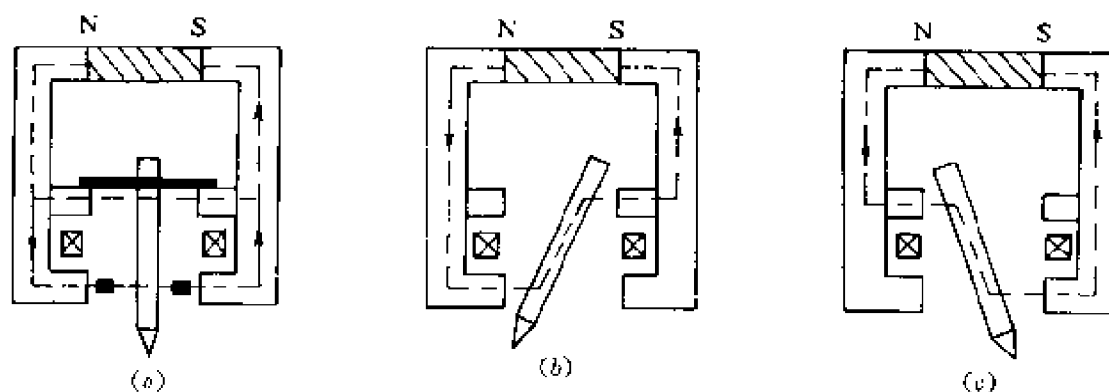


图 24.11 电磁拾音器的结构原理示意图

图 24.12 示出图 24.11 (a)电磁拾音器的简化等效力学网络图,其中  $C_{m1}$  是唱针臂力顺,  $M$  是衔铁质量,  $C_{m2}$  是垫圈力顺,  $R_m$  是垫圈力阻,  $v$  为唱针振动速度,  $v_1$  为衔铁振动速度。因为电磁拾音



器线圈中感应电动势与衔铁振动速度成比例,故拾音器空载灵敏度

$$S_0 = k \frac{v_1}{v}$$

式中  $k$  为比例系数。 $\frac{v_1}{v}$  与频率  $f$  的关系表征拾音器的频率特性,如图 24.12(b)所示。

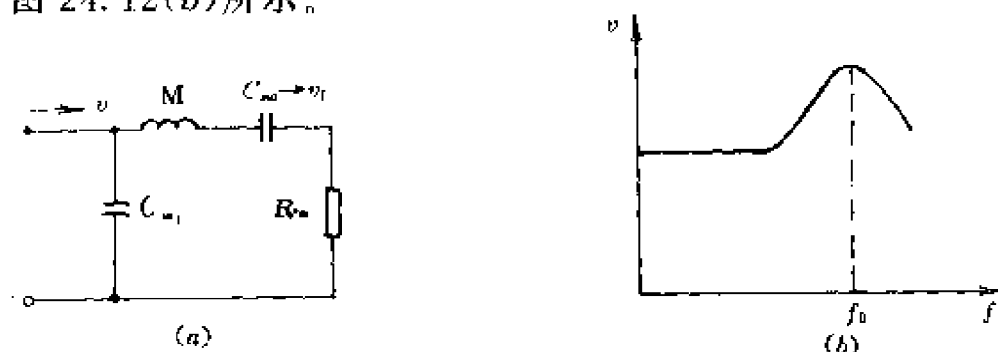


图 24.12 电磁拾音器的等效力学网络与频率特性

### 24.3.2 压电拾音器<sup>[6]</sup>

利用压电材料的压电效应可设计制作拾音器,其性能在很大程度上取决于所用压电材料的类型。罗息尔盐压电单晶体材料的拾音器有灵敏度高和阻抗较低等优点,缺点是电容量随温度变化大,且易潮解。 $\text{BaTiO}_3$ 、PZT 和 PMS 等压电陶瓷材料的拾音器有防潮和耐湿

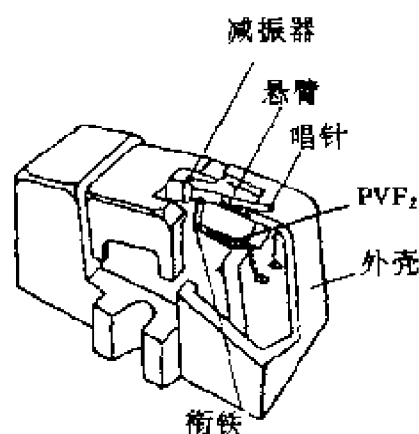


图 24.13 电唱机拾音器示意图

性能好等优点,缺点是要加  $2\text{M}\Omega$  以上的负载才能获得较好的低频响应。 $\text{PVF}_2$  等压电高聚物薄膜的拾音器有阻抗低、塑性好和谐振频率高等优点。压电高聚物电唱机拾音器的结构如图 24.13 所示,其中压电换能器是刚度小、柔性好的  $2 \times 1\text{mm}$  薄膜元件。如图 24.14 所示,压电高聚物拾音器的频率达  $4.5\text{kHz}$ ,还有良好的频率响应,它已获得广泛应用。

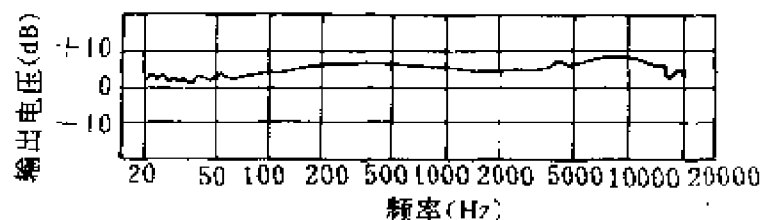


图 24.14 拾音器的频率响应

## 24.4 送 话 器

通信用传声器称送话器,它是将声振动转换为电信号的声接

器。它与受话器不同,受话器的性能指标主要的是灵敏度,而送话器的性能指标不

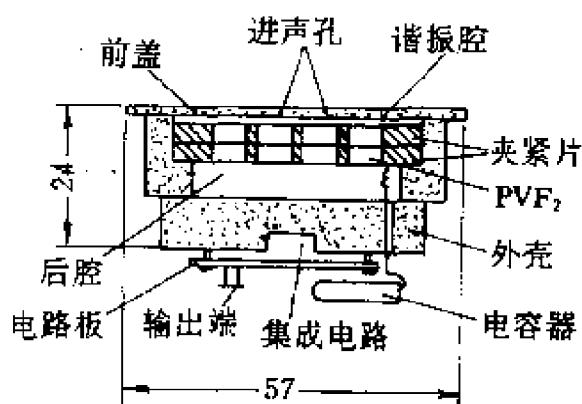


图 24.15 压电高聚物薄膜话筒器的结构原理示意图

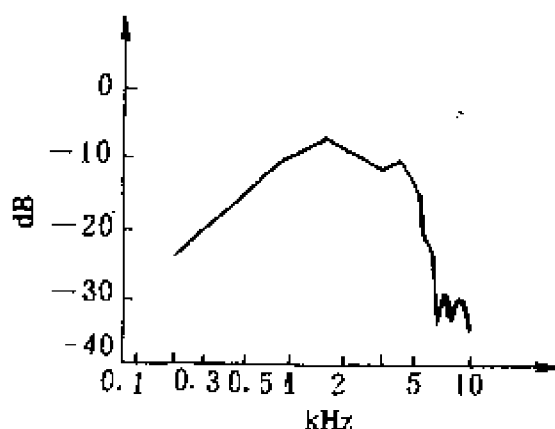


图 24.16 PVF<sub>2</sub> 送话器的频率响应

#### 24.4.2 电磁送话器

电磁送话器的结构原理如图 24.17 所示。膜片受声压差作用向下移动时,下半部的可调极柱与振膜之间的距离减小,下半部磁路的磁阻随之减小。在磁动势一定的条件下,磁路中的磁通量增加,从而在线圈中产生感应电流。感应电流的方向由楞次定律决定。同时,

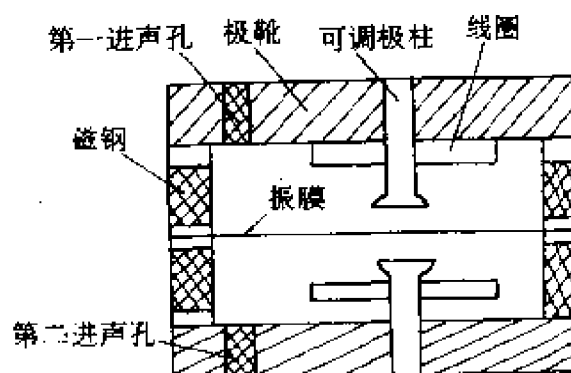


图 24.17 电磁送话器的结构原理示意图

上面的可调极柱与振膜间的距离增加,上半部磁路的磁阻增大。在一定的磁动势下磁阻增加,使磁通量减小。这样,上半部线圈也产生感应电流,其方向也由楞次定律决定。若按使送话器输出端电流加强的原则连接上、下线圈,则输出端必有电流流通。

振膜在声压差作用下作交变振动时,感应电流的方向也随之改变,感应电流的大小与振膜的振速成比例。

## 24.5 扬声器

和上述传声器、拾音器和送话器相反,扬声器是将电能变换为声能。这种将电能变换为声能,并将声能辐射到室内或开阔空间的电声换能器称扬声器。扬声器有动圈式、静电式、离子式和压电式等多种类型,其中压电高聚物薄膜扬声器有阻抗低、塑性好、能加工成任意形状,十分引人注目。这里简述压电高聚物薄膜扬声器的原理、结构和性能<sup>[6]</sup>。

### 24.5.1 原理

压电扬声器的关键部件是压电电声换能器,压电高聚物  $\text{PVF}_2$  的电声换能器工作原理如图 24.18 所示。由图可看出,沿  $z$  轴加交流电场到薄膜上,则薄膜作横向( $x$  轴)振动,如图 24.18(a)所示。若将薄膜弯曲成图 24.18(b)那样,则长度伸缩振动转换成垂直方向的脉动、向外辐射声波

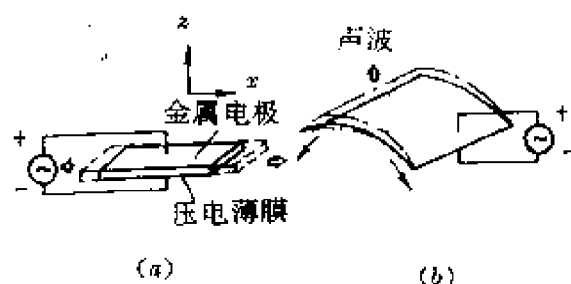


图 24.18 压电高聚物薄膜的横向  
振动转换成脉动的原理图

研究横向应变与脉动幅度之间的关系时,假设压电高聚物薄膜的整个振膜作同相位运动,其振动幅度由振膜中心到固定边缘以抛物线状减小,则可得下面的相互关系。假设图 24.19 中振幅

$$\zeta = \zeta_m \left(1 - \frac{\theta^2}{\alpha^2}\right) \quad (24.6)$$

式中,  $\zeta_m$  是振膜中心的振幅;  $\alpha$  是扇形的半角。  $\zeta_m$  与  $\alpha$  的关系如图 24.20 所示。

应变  $S$  由下面的公式计算:

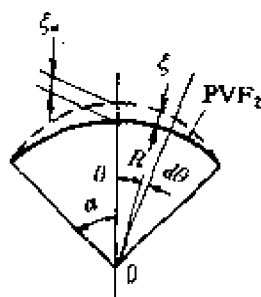


图 24.19 计算脉动幅度  $\zeta$  的示意图

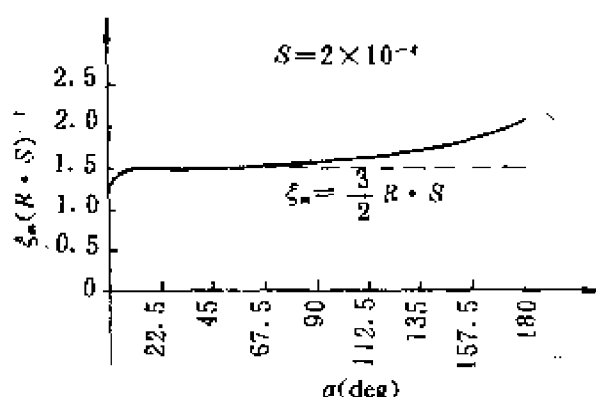


图 24.20 位移的最大值  $\zeta_m$  与张角  $\alpha$  的关系

$$S = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\int_0^\alpha (R + \zeta) d\theta - \int_0^\alpha R d\theta}{\int_0^\alpha R d\theta} = \frac{1}{R \cdot \alpha} \int_0^\alpha \zeta d\theta \quad (24.7)$$

式中  $l$  是弧长;  $l_0$  是  $\zeta=0$  时的弧长;  $R$  是  $\zeta=0$  时的扇形半径。将式(24.6)代入式(24.7), 当  $10^\circ < \alpha < 90^\circ$  时, 得

$$\zeta_m = \frac{3}{2} R \cdot S \quad (24.8)$$

### 24.5.2 结构

压电扬声器的结构有多种, 全指向性高音高聚物薄膜的扬声器结构如图 24.21 所示。用图 24.21 的结构容易控制扬声器的指向性, 它由两个厚  $27\mu\text{m}$  的压电高聚物薄膜的圆管组成。小圆管半径 30mm, 高 60mm, 频率 7~20kHz; 大圆管半径 60mm, 高 90mm, 频率 2~7kHz。为了激励压电圆管, 需要用—个升压比为 10 的升压变压器。

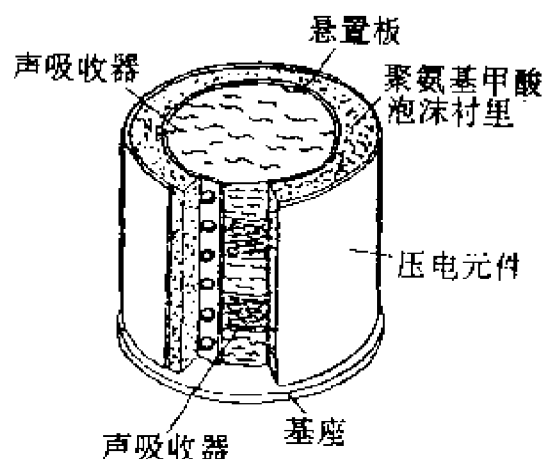


图 24.21 压电高聚物薄膜的扬声器结构示意图

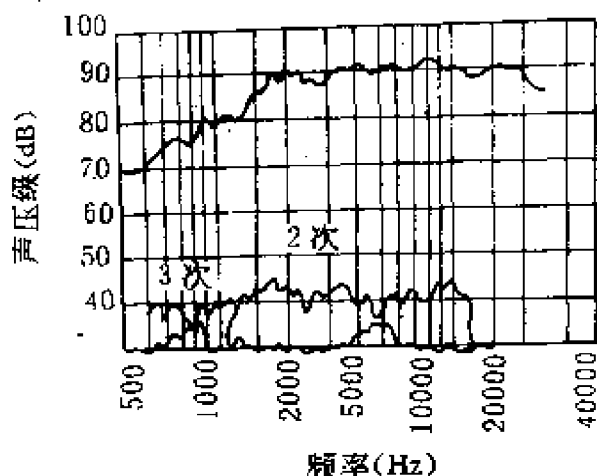


图 24.22 扬声器的频率响应  
和谐波失真特性

### 24.5.3 性能

图 24.21 结构的扬声器频率响应和谐波失真特性如图 24.22 所示。扬声器的距离为 1m, 输入电压为 5V,  $0\text{dB}=0.0002\mu\text{Pa}$ 。如图 24.21 所示, 因为聚氨基甲酸酯泡沫衬里有足够的机械阻尼, 故 2~20kHz 的频率响应不均匀度在  $\pm 2\text{dB}$  内。

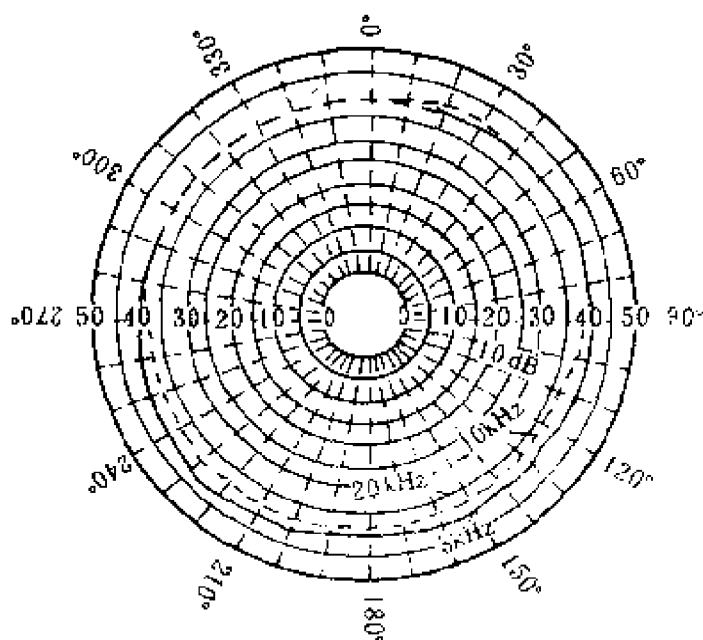


图 24.23 压电高聚物薄膜高音扬声器的指向性图案

图 24.21 结构的扬声器的指向性图案如图 24.23 所示。全指向性图案几乎达到 20 kHz。压电高聚物薄膜能在很宽的输入电压范围保持线性度, 如高音扬声器可由有 18V 连续电压的正弦波 (相当于  $8\Omega$ , 40W 功率) 驱动, 它没有任何损坏。而动圈式高音扬声器由于在大功率输入时音圈的温度升高, 故有损坏的危险。压电

高聚物扬声器的最大功率仅受压电高聚物薄膜的电击穿限制,用作高音扬声器的压电高聚物薄膜厚  $30\mu\text{m}$ ,其室温击穿电压约为  $2000\text{V}$ 。

## 24.6 耳 机

和前述扬声器一样,耳机亦是将电能转换为声能,这种将电能转换为声能并与人耳直接耦合的电声换能器称耳机。耳机有动圈式、电磁式、压电式、驻极体式和骨导式等类型,当今最引人注目的是压电高聚物薄膜耳机和驻极体耳机。这里简述压电高聚物薄膜耳机的原理、结构和性能<sup>[6]</sup>。

### 24.6.1 结构原理

压电耳机的电声换能器工作原理如图 24.18 所示。因压电耳机是在很薄的压电高聚物薄膜( $8\mu\text{m}$ )上加电压驱动,故其频率响应相似于静电型耳机。声频信号到达头戴耳机时,激励器系统的高聚物压电薄膜以理想的“呼吸运动”式的收缩和扩张,使

人有逼真的感觉,几乎没有机械声频响应。压电耳机的音色特性可与静电型耳机相比,而压电耳机不需要匹配变压器,它的插头直接插到放大器或受话器的耳机插孔上。

压电耳机的结构有多种,图 24.24 示出电声换能器用压电高聚物薄膜的高音质立体声耳机的结构图。这种耳机结构简单、重量轻、很薄,已商品化。它不需要配置电源,湿气不会降低灵敏度,在输入功率大时不产生刺激人的噪声(这是静电型耳机不可避免的),谐波失真甚至在输出声压为  $110\text{dB}$  时也不大于  $1\%$ 。

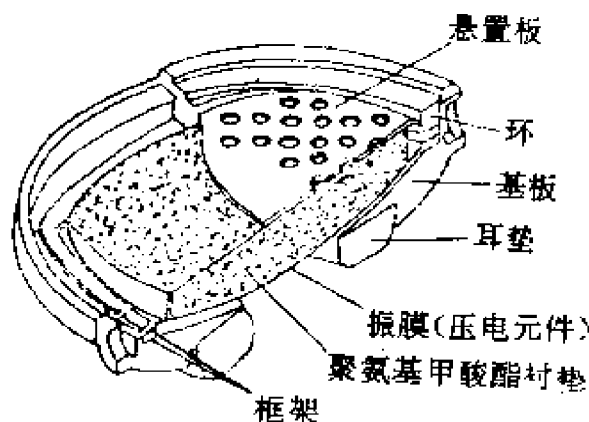


图 24.24 压电高聚物薄膜耳机的结构剖面图

### 24.6.2 性能

动圈型耳机的灵敏度高,它可以用于任何放大器中,并且成本低。缺点是振动系统的重量难于降低,其中心驱动结构不利于改善高频响应和瞬态特性。

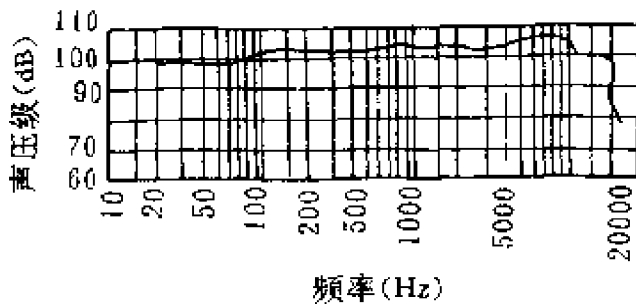


图 24.25 压电立体声耳机的频率响应(输入电压 3V,无升压变压器)

和动圈型耳机相比,静电型耳机最容易实现高质量。原因是薄而轻的静电振膜以相同的相位驱动。静电型耳机的缺点是灵敏度高,原因是它不能直接用于一般的放大器中。其最高灵敏度受空隙电击穿的限制,一般静电型耳机(包括用驻极体的耳机)已在接近最高电平使用,通常动态范围不宽。若要产生足够的声压级,约需 100V 的高输入电压,这就需要一个变压比为 50~100:1 的变压器。

压电耳机是在很薄(8 $\mu$ m)的压电高聚物薄膜上加电压驱动,故其频率响应相似于静电型的。一个小的输入电压(如 3V)就能在仿真耳(B&K4153 型)上产生 100dB 声压级,如图 24.25 所示。因此,压电型耳机和动圈型耳机一样,可以直接用一般放大器来驱动。

压电耳机的技术性能根据不同使用要求而设计,下表列出日本生产的两种高音立体声耳机的技术性能。

高音立体声耳机的性能

型 号	SE 5000	SE 700
参 数		
静电电容( $\mu$ F)	0.08	0.07
频率范围(Hz)	20~20000	20~20000



续表

型 号 参 数		SE-5000	SE 700
灵敏度(dB/3V)		100	100
换能器(或驱动器)		8.5 $\mu$ m 压电高聚物薄膜	7 $\mu$ m 压电高聚物薄膜
最大输入电压(V)		30	30
连接电缆和插头		网孔电缆 3m, $\phi$ 6.5mm 三芯插头	网孔电缆 3m, $\phi$ 5.5mm 三芯插头
匹配阻抗( $\Omega$ )			4~16
重量(g)	不包括电缆	315	295
	包括电缆	370	345

## 第二十五章 人机接口技术

随着机器人应用领域的扩大,人和机器人的接口技术越来越重要。机器人的指令和示教方式,人和机器人分担的作用的协调工作,与人们的对话(通信)功能,机器人的智能化及对人们的安全性等是人机接口的重要技术。机器人从人们的语言中准确、适当地理解出命令,并制定执行规划,在各种各样环境中进行工作,报告工作状况。这时,机器人识别人们的声音,理解日语、英语、汉语等自然语言的意义,具有与人类自由交换信息的功能。

### 25.1 给机器人的指令方式

机器人按照人们给予的工作命令行动。给机器人的指令方式,依据机器人的工作执行能力与智能水平而异。机器人具有视觉、触觉和移动等功能,随着机器人适用领域的扩大,机器人的动作变得复杂,因此给机器人的指令和示教方式要求人们负担少、操作性好的人机接口技术。给机器人的指令方式分成四种:(1)示教放演方式;(2)用机器人语言的指令方式;(3)用图形数据的指令方式;(4)用遥控操作技术的指令方式。表 25.1 列出在各指令方式中的示教方式、人与机器人的作用、联系人与机器人的接口工具及工作对象。

表 25.1 给机器人的指令及示教方式

	指令方式	示教方式	人 的 作 用	机 器 人 的 作 用	工 具	工 作 对 象
1	示教放演方式		工作的直接示教	记录数据的再现	示教盒等	点焊、粉刷等工作

续表

	指令方式	示教方式	人 们	机 器 人	工 具	工 作
2	用机器人语言的指令方式	用点、激光点、面的工作环境示教	程序的示教 工作环境的示教	按程序顺序 执行工作和 视觉联系	模拟器和传感器的通信脱线程序方式	组装工作 及其他
3	用图表(CAD数据)的指令及示教方式		用组装完成图的微命令	知识的利用、解决问题的功能与视力的协调	CAD数据库、图表、手控系统	组装工作 及其他
4	用遥控操作技术的指令方式	用主要手臂的直接示教,复用显示器及声音示教	靠微指令示教,作大概状况判断的电传操作器	自主型的行动、工作困难时指望操作器的指示	语言介入型多重从属系统、软件开发工具、复用显示器声音输入输出器、数据库等	在宇宙、海洋、原子能设备中的遥控操作器作业

## 25.2 机器人的工作环境示教系统

### 25.2.1 工作环境的理解

机器人工作时,机器人必须理解包含直接工作对象在内的的工作环境。工作环境信息中特别重要而又基本的是环境内的物体形态、大小、位置、姿势等信息。

#### (1) 机器人动作的模拟

机器人执行工作程序之前,要检查程序是否正确描述了工作。特别是多台机器人组成的生产线,由于其中一部分变更会使生产线停止工作,必须短时间完成变更使生产线停止时间最少。用图形表示的工作动作模拟对程序检查极有效。

#### (2) 高水准语言的机器人工作程序

机器人能自动理解自己的工作环境是理想的,但实际上不可

能。识别三维物体为目的、使用电子计算机的人工视觉,其适用范围还有限制。依靠三维位置信息的视觉,即使能理解面的位置、方向、大小等三维空间构造,但也不能说能理解工作环境。

全用语言描述工作环境模型不现实。人进入工作环境测出必要的位置和尺寸,将其结果作成描述语句,再由键盘打入计算机,这样处理人的负担太大,出错的可能性也大。读取作出的描述语句,对其检验也困难。因此,用交互示教让机器人理解自身工作环境的方法很重要。

### 25.2.2 工作环境的示教

对机器人作工作环境示教时,必须使存在的三维环境模型化。人们看实际环境,容易观测各个物体间的相对关系,但是,对其位置、姿态等不能用数值精确观测,即使给出描述环境的多种数据,要通过这些数据在空间正确理解并把握住情况也极困难。因此,如何使示教方法确保机器人和人的接口十分重要。环境示教的处理有三类:(1)实际三维环境内的位置数据测量和输入;(2)从得到的数据构成环境模型;(3)环境模型的表示。对第一类,要求能对用于简单操作示教所必要的点位置作测量和输入,并使其精度高。第二类要求有能追加必要的信息、修改容易并且利用方便的内部数据结构,并有人们负担少的模型生成手续。对第三类,要有内部生成模型的可视化功能,以及对象与其模型相对照的功能。

## 25.3 语音识别技术

语音是人类最基本的通信手段,利用语音向机器人发指令,或从机器人那儿得到语音回答,该技术称语音识别合成技术。这里仅讨论语音输入即语音识别技术。

### 25.3.1 语音识别的基本知识

人类的声音,有担负传递信息的以语言声音为主的不同语句的音韵信息,有声调和抑扬的调韵信息,以及说话人特有的个性信息。声音含有乱七八糟的噪音的声音声压波形为一维时序的信号,分离并取出这些信息不容易。语音识别技术是把音韵信息和调韵信息作为物理音响参数抽出来,用唯一性模式识别技术识别未知的输入语音。

音素是语言声音的有限个记号,一到几个音素结合起来,能单独发声的单位称音节。在语音识别中,必须将原来在时间上连续的物理量变换成这种描述单位的序列。

语音的生成,可认为是由于肺吐气造成声带振动作为声源在声道(口腔和鼻腔)产生共鸣引起的。因此由于声道的形状随喉、舌、唇等的动作而动态变化,产生成各种各样的音韵序列。振动声带的音韵叫有声音,音源处在口腔的狭窄位置。声道的共鸣特性支配音韵的音响固有特性,听觉系统有对语音的分析功能。

语音识别系统的基本构成如图 25.1 所示。最初,抽出载有音韵信息的特征参数,下一阶段是基于这些音响参数进行第一级的描述单位变换,单位是音素、音节或单词。这种输出序列是中间阶段性结果,可用有冗余度的点阵表示。

表 25.2 列出语音识别系统按识别对象的分类。表中各项均按(a)、(b)、(c)的顺序增加难度,特别是(c)的实现有极复杂的式样。首先是难在音响级别上分离说话者的变动和文法的变动、定出音

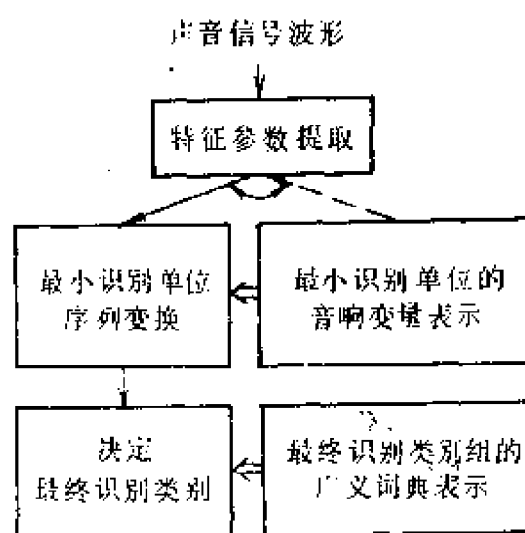


图 25.1 语音识别系统的基本构成

韵的固有特性,其次是在符号级别上语言声音具有复杂式样。因此,构成实际系统时,最初必须明确规定对象和性能。

表 25.2 按识别对象的语音识别系统

说话者	语句数目	发声方式
(a) 特定说话者 (已登记的说话人)	(a) 小规模 (几十句以下)	(a) 孤立发声单词
(b) 部分学习适应形式	(b) 中规模 (几百句以下)	(b) 连续发声单词
(c) 不特定说话者 (独立的说话人)	(c) 大规模	(c) 连续发声 (文章、会话等)

### 25.3.2 语音分析和特征提取

#### 1. 概述

语音特征的提取要看生成过程或听取过程。前者以声源特性、声道特性和唇的张开特性三者之积为基础把声波特性模型化。后者根据听觉系统的频率分析功能,对声波的功率谱进行分析。图 25.2 示出声波的富氏功率谱、包络、共振,以及和包络几乎等价的声道断面。

#### 2. 功率谱包络的估值

谱包络的估值法有三种:(1)带通滤波器群法;(2)主导项法;(3)线性预测分析法。

滤波器群的方法是决定各滤波器特性和滤波路数、计算它的输出功率的最直接的方法。通常,中心频率间隔、带宽取对数尺度,50Hz~7kHz 作为分析对象。

主导项方法使用快速富氏变换(FFT),用图 25.3 所示的算法,主导项的低阶项表示原来的谱包络成分,所以各系数本身是参数。

线性预测分析方法是将时间序列假定成自回归模型。信号时

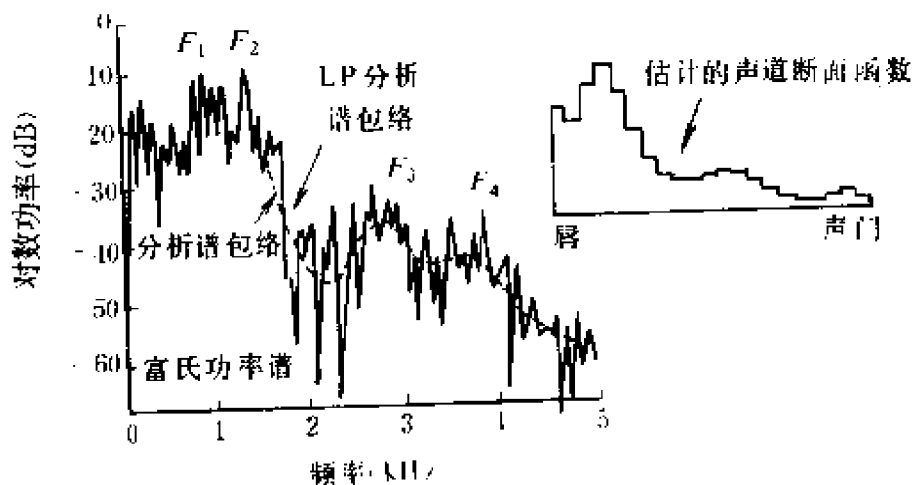


图 25.2 语音参数分析

间序列为  $x_t$  时,模型为

$$x_t = \sum_{n=1}^N a_n x_{t-n} + G u_t \quad (25.1)$$

式中,  $a_n$  是预测系数,  $G$  是增益常数。当  $u_t$  为输入、 $x_t$  为输出时,  $z$  的传递函数  $H(z)$  为

$$H(z) = G / (1 + \sum_{n=1}^N a_n z^{-n}) \quad (25.2)$$

这时,功率谱包络由  $z = e^{j\theta} (\theta = 2\pi f \cdot \Delta T)$  得到。系数  $a_n$  由信号  $x_t$  及其预测值的阶乘误差最小的评价函数导出。求解  $a_n$  的方法有多种,其中与语音分析相关的参数相关 (PARCOR) 分析法,如图 25.4 所示。由图中的  $k_n$  (偏自相关系数) 能计算  $a_n$ 。

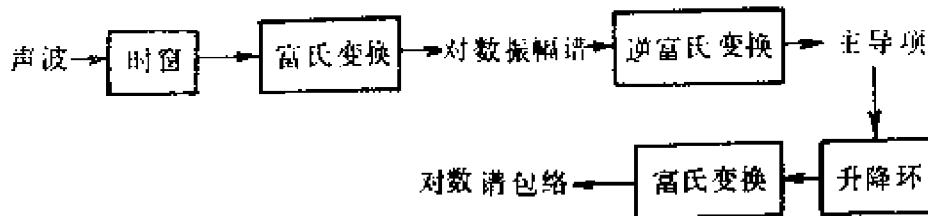


图 25.3 用主导项法求谱包络的过程

### 3. 声道断面的估值

声道断面的形状可看成一根音响管,其近似于筒状短节管的

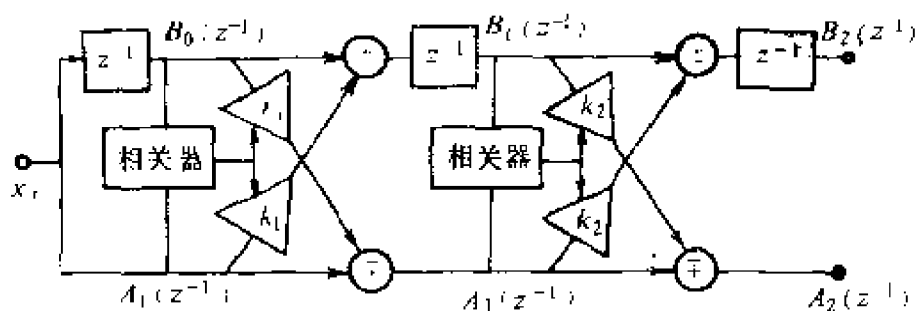


图 25.4 PARCOR 的系数计算回路

连接，用其连接面的反射系数能求声道的  $z$  传递函数。适当的边界条件，能证明反射系数和  $\{k_n\}$  相等。根据这个理论能对声道形状估值。

#### 4. 共振的提取

提取共振的方法有许多方案，能应用到自动识别的是基于线性预测分析方法和基于瞬时谱的方法。用线性预测方式，可由式 (25.2) 的极点求共振。但是，阶数  $N$  的同时估值，必须由极点中选择与共振相当的东西。利用瞬时谱时，必须考虑稳定性和精度的时空处理。对共振的提取，不仅是它的位置，识别系统希望强度和宽度的信息也能参数化。

### 25.3.3 语音单词的识别

#### 1. 概述

单词识别是区别出每个单词发声的孤立单词，以及允许几个单词连续发声的连续单词。单词识别系统可按表 25.3 那样分类。

表 25.3 按方法对单词识别系统的分类

最小识别单位	识别方法
(a) 单词	(a) 模式匹配
(b) 音素	(b) 识别函数方法

以音素(或音节)为基本单位的方式，若对称作单音素的少量类别决定出标准模式，则对识别对象的单词组合的交换用符号处



理就行了。另外,对处理大容量词语的系统,单词单位的登录必然困难。因此,不特定说话者和大词汇等高性能系统,音素作为基本单位的方式有利。另一方面,用单词作为单位的方式,能避免音素作为单位时区分音素的麻烦问题,有文法音韵特性变动也能照样处理的优点。

## 2. 识别音素为基础的方式

这种方式的基本点如图 25.1 所示。用准备好的音素的标准模式部分,必须根据音响参数的特性细分类别。通常音素一概用一段分类有困难,还要考虑设定无声破裂音、有声破裂音、鼻音等类别。这些类别领域的设定,各类别的方差必须尽可能近似,用单纯的线性方法作区分的线性处理,或利用群的方式则是有效的。

## 3. 单词作为基本单位的方式

这种方式处理对象全是单词,是把每个单词的标准模式以音响参数形式准备好的方式。这是针对特定说话者的。对特定说话者变动的主要因素只是时间轴上的伸缩,而对不确定的说话者,还要加进在空间方向的变动。因此,作为整个单词的模式,后者的时空模式极其复杂。特定说话者系统力求方式简便,而对不确定说话者,标准模式必须多模块化。

单词为单位的识别方法有用数据处理(DP)的时间轴上非线性伸缩匹配法。设标准模式的时间序列为  $A_n$  ( $n$  为类别),未知输入模式的时间序列为  $B_k$  时, $A_n$  和  $B_k$  的距离作为整体量,用 DP 法求出  $B_k$  对所有  $A_n$  的距离最小偏差函数,使这个距离最小的  $n$  为

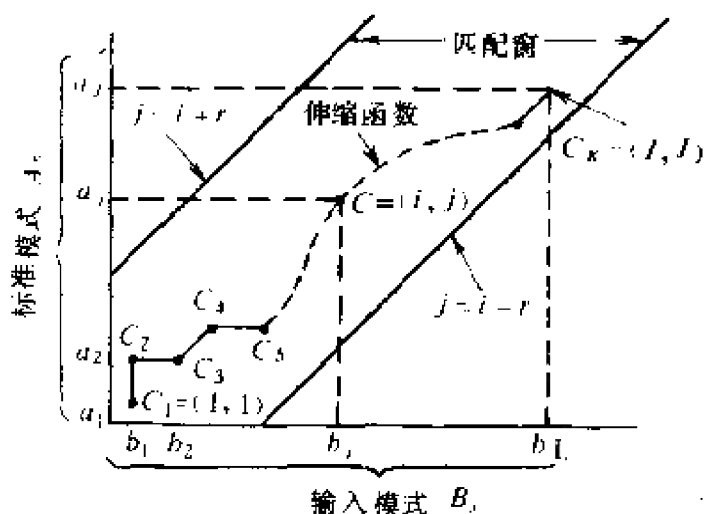


图 25.5 DP 法的时间归一化的匹配原理

输入  $B_x$  的类别。这就是伸缩匹配法,如图 25.5 所示。这种方式有  
两端点处理法等几种方法。作为参数,把提取出的值原封不动使用的  
多,也有根据提取参数值的矢量量化,用量化后的单位代替标准  
模式和输入模式的方法。用这种方法能显著减少计算量。

#### 25.3.4 连续单词识别和连续语音识别

连续单词识别是容许单词与单词之间可以不暂停发音,单词  
作为基本单位的识别。这种识别的有效方法有 2 级 DP、连续 DP  
法等。

连续语音识别包括从上述连续单词延长的给单词序列添加语  
法约束的识别,到以一般会话语音为对象的识别。后者在 70 年代  
称“语音理解系统”。

### 25.4 自然语言系统

用自然语言的机器人系统还未能实现,建立有自然语言功能  
的人机接口是重要课题。

自然语言处理技术有广阔应用范围,自然语言处理作为机器  
翻译在世界上曾热门一时。但过去计算机能力没有达到能处理自  
然语言的水平。当今由于计算机能力的飞跃进步,自然语言处理技  
术,自然语言意义的理解的研究有了积累,机器翻译的研究又盛行起  
来。自然语言系统有四种用途:

- (1) 自然语言接口:向机器人、教育学习系统及各种数据库  
发指令、提问、回答时的接口;
- (2) 机器翻译;
- (3) 语言数据的处理;
- (4) 语言教学。

## 25.4.1 句法分析

掌握语法规则的方法有造句语法和依存语法。

### 1. 造句语法

句子由几个构成成分组成,各成分又由一个或几个构成单位组成,造句语法就是根据这些结构实现构成成分直接分析的方法。图 25.6 示出简单造句语法例,图 25.7 示出用造句法的分析树。

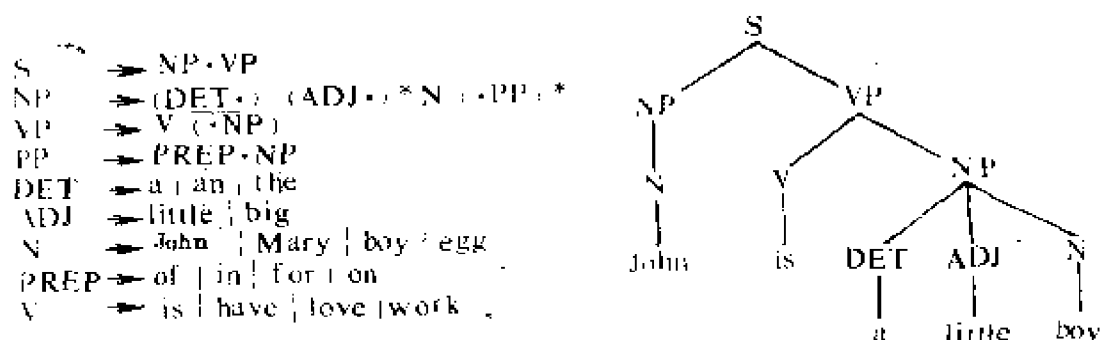


图 25.6 简单造句语法      图 25.7 用造句法的分析树

造句规则,一般称作改写规则,定义为符号并列的集合。改写规则是以下的形式化语言:

$$X \rightarrow \alpha$$

$$X \rightarrow YZ$$

$\alpha$  是最终符号(单词)

X、Y、Z 是非最终符号(语法类别)

这种形式化语言,被称作文理自由语言,有几种确定的造句分析方法。形式化语言的计算机语言属于文理自由语言范围。

自然语言与计算机语言相比,前者建立在相当复杂制约的基础上,它的语法规则不可能作为描述造句规则。在语言学领域,语言区分成语言的语义(语言能力)和语态(语言运用),语义机构在语法框内,可展开成根据造句法生成的深层结构和它的树构造变形得到的表层结构的二级构造理论(变形语法理论)。

变形语法理论是从生成句子观点出发的语言理论,不能原封不动地作为语句分析使用。以造句法作基本框的语句分析方法有

增广变换系统(ATN)和语句调整语言(LINGOL)等。

ATN 是分析文理自由语言的递归变换系统 (RTN)的强行扩张。图 25.6 的语法规则用 RTN 的图式书写成图 25.8 那样。PUSH 调出别的转移图,POP 就从那儿返回,另外,JUMP 意味着无条件的转移,根据输入语句的语法类别顺次在转移网络上进行状态转移。语句读完时若 S 的状态转移图给出“成功”,语句作为正确的东西被识别。状态转移的时候,ATN 不仅能检知语句的语法类别,也能检知这样那样的条件(性、数一致,时态等),另外设置几个具有堆栈功能的寄存器,能设定出语法上的各种各样的参照变量。

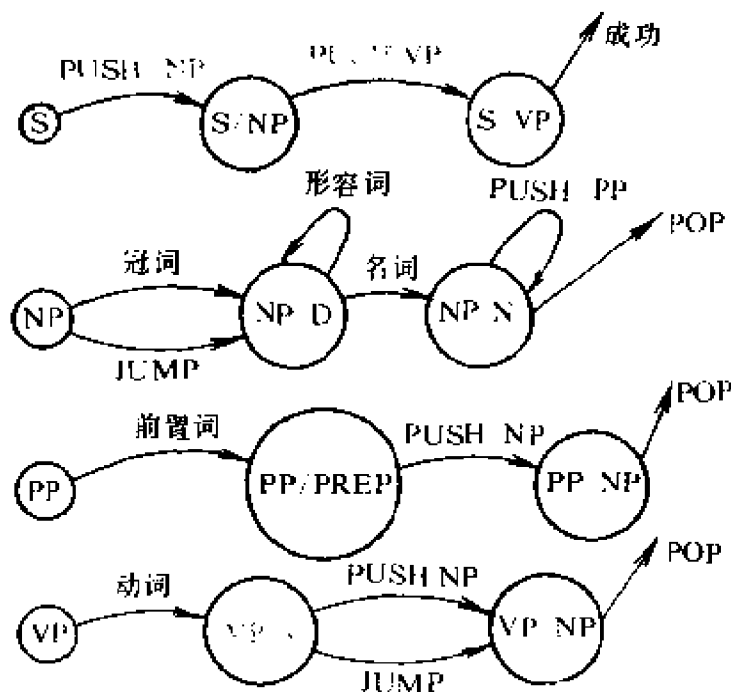


图 25.8 造句语法的 ATN 表示

LINGOL 是以一般所知道的把文理自由语法作为高速造句分析算法的阿莱(Early)算法为基础。这种算法,把改写规则从左往右逐次展开,预测有可能的语法类别。LINGOL 还增补了

$$\alpha \rightarrow \beta(\text{cog} \cdot \text{sem})$$

的改写规则。对 cog · sem 部分能写成任意程序。cog 是控制从可

能的几个造句分析树中取出最妥当的一个的分析过程。sem 是在造句分析树给出后在节点作整体含义匹配,提取意义信息。进一步,它设定 advice 部分来描述改写规则的可能适用条件,再直接控制分析过程。

## 2. 依存语法

造句语法本质上是按符号并接顺序规则作描述的方法,像英语那样语句顺序决定了基本语法关系的语言描述是很自然的方式。但汉语、日语语句在顺序上有制约,从而使基本的语法关系不仅由语句的并接顺序还由功能词的作用决定。

依存语法是描述语句与语句间支配、依存的关系,它比造句语法更具有意义主导的含义。日语语句的分析系统格式语法较多。

用格式语法分析句子,要把格式结构取出来进行必要的变形,检验出其中记载含意的制约条件。得到的结果成为以相关词语为引导的陈述句。格式语法作为语句间的依存结合规则,每个词语的用法作为依存结合规则记载在词典中进行分析,是语法规则主导型的句法。

还有比格式语法更深层的、试图在概念上描述依存关系的概念依存方法。用这种方法,能把所有陈述句的意义作为几个基本动作的组合来描述,详细描述各个陈述句的概念结构,在此基础上引出句子的概念依存结构。用这种方法,具有同一含义的句子能变换成同一概念依存结构。

## 25.4.2 含义理解

语句表现某些场合的某些状态(不限于物理的或具体的场合与状态),语言是指出某些场合的某些对象。与语言指出的东西相对应,能重构场合与状态时,首先要能理解语句的含义。为对含义理解作模拟,必须有对象世界的模型。前述的造句分析,是含义理解前的问题。含义理解问题,现在处在积木化研究的阶段,是今后研究的领域。

语句分析中,如果还没到含义理解的阶段作为不能解决的问题有补充省略语句问题、代名词、指示词指示的东西的同态问题等。机器翻译的应用中,有不许同其他词语省略的场合,也有必须特别指定指示词的人称、性、数等的场合。另外,向机器人发指令或者与专家系统对话时,不允许省略表示、指示表示。现在关于这些问题,有在被限定的状态中采用为同态需要的特殊算法。

人们在社会生活中会自然地学习词汇,掌握文法、语法。在自然语言系统中,有必要预先把语汇词典和各种规则作成数据库。如果系统的输出有不当,人们必须会发现和修改数据库的差错。另外,若有没登记的词语,必须登记。如果系统具有某种自动学习词汇和各种语法、订正差错的能力,这些工作就容易。因此,对语言的学习能力关系到什么级别上的含义理解问题。

# 第四编

## 机器人视觉

人类视觉信息系统包括眼睛、中枢神经和视网膜。机器人的视觉信息系统类似于人的视觉信息系统,它包括图像传感器、数据传递系统,以及计算机和处理机。本编分两章介绍机器人视觉信息系统,其中第二十六章论述的图像技术包括图像传感器、图像表示、代码和硬件,第二十七章论述的机器人计算机视觉包括目标识别与分类、视觉系统与调节,以及软件设计。

## 第二十六章 图像技术

### 26.1 点式图像传感器

通常,图像传感器可根据它们对波长的灵敏度分类,即根据它们能否响应明暗、彩色、红外线、X 射线、紫外线等各种光源进行分类。但为了方便,可将图像传感器按维数分类,即分为点式、线列式、平面式和立体式传感器。

点式传感器类似于“电子眼”,它实际上是一种光敏晶体(三极)管。因为这种传感器仅敏感空间单独一点的光,故称点式传感

器。这种传感器能跟发光二极管耦合,用作非接触型“感受器”,如图 26.1 所示。图中,仅物体位于  $d_n$  和  $d_t$  之间才被敏感, $d_t$  以外的点在传感器观测空间范围之外。

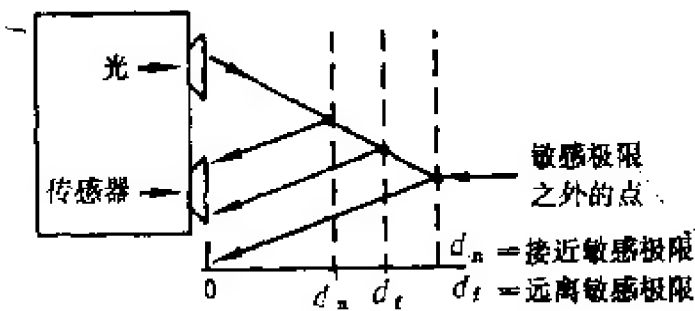


图 26.1 非接触探测器一点式传感器

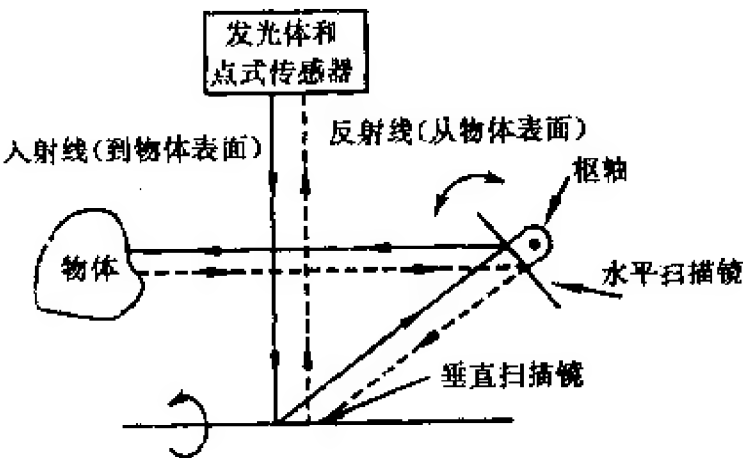


图 26.2 点式传感器和往复偏转镜组成的图像扫描系统

探测器通过小的“接收孔径”监测光信号。若物体在接收孔径前,则光被物体表面反射,并由传感器接收;若接收孔径前无物体,则传感器敏感不到。点式传感器借助辅助装置可获得多维视觉信号。例如,通过正交扫描镜或  $x-y$  工作台可实现景物扫描,如图 26.2 所示。



## 26.2 线列式图像传感器

线列式传感器是一维器件,可用于获取景物的视觉信息。常用的这种传感器有光电二极管和电荷耦合器件构成的“线形阵列”,它们的工作原理相似,二者都跟“模拟移位寄存器”等效,该寄存器产生一个连续的同步输出电信号,这种电信号的幅度对应于落在光积分单元(integrating light-collecting cell)上的光强。其工作原理如图 26.3 所示。这种线列器件的光输出只能以序贯方式获得,即不可并行得到各单元的输出。这说明景物的光强仅可在有序序列中获得,而不能随机获取。在对所选取的点光强获取时刻所有要求时,上述情况将造成一些影响。阵列除直线式外还有其他形式,如图 26.4 所示的圆式和交叉式排列。

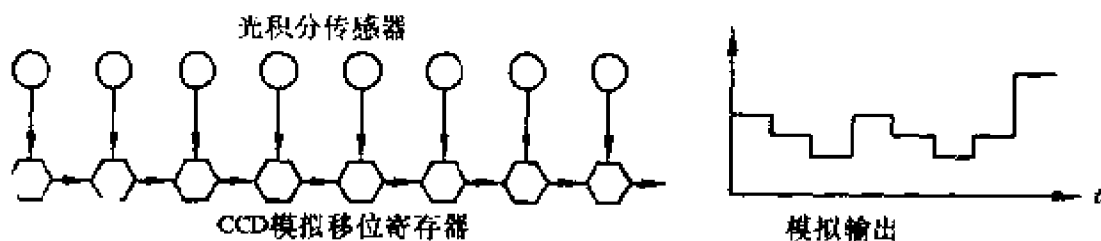


图 26.3 线式扫描阵列原理图(模拟输出信号由积分传感器收集的光强表示)

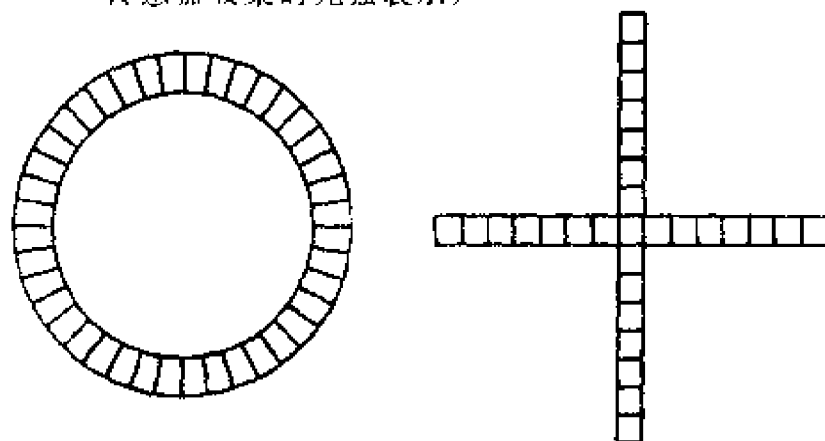


图 26.4 光传感器的圆式和交叉式结构

线式阵列通过适当的扫描装置则可用于获取景物的二维图像。例如,通过固定线式传感器的位置,并在垂直于阵列的方向上移动物体,则可扫描整个物体。机器人系统中的这种应用如图26.5所示。

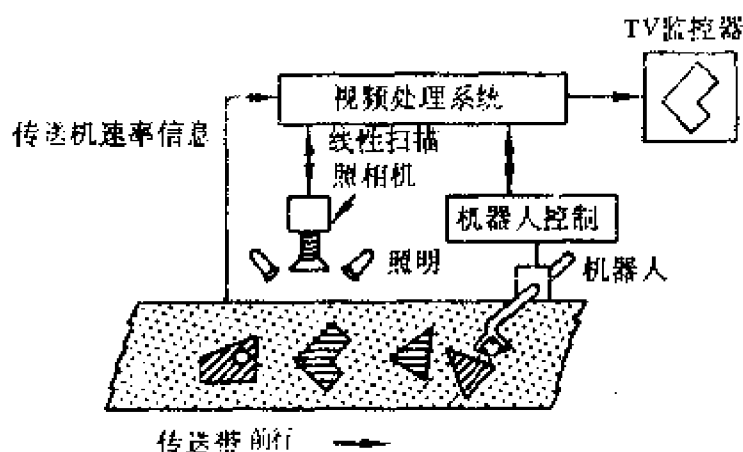


图 26.5 用线性扫描照像机获取二维图像的自动机器人分类系统

## 26.3 平面传感器

平面传感器是一种由线性扫描概念扩展到二维结构的传感器。目前广泛使用的是这种传感器中的两种通用类型：扫描光电倍增器和固态传感器。

扫描光电倍增器以电视摄像机为代表。使用最普遍的电视摄像机是光导摄像管,它实际上是一种光电变换器。当光电靶受到可见光谱内的光子轰击时,光电靶释放电子。这些电子被扫描电子束的电流所采集。电子束以光栅方式扫描光电靶(见图 26.6)。光栅扫描的速率和方式,随世界各地所定标准的不同而有差异。

下面更详细地说明这种摄像管的工作原理。光图像会聚在透明电极板之后的光电导靶面上,当光照射光电导靶面时,靶将电荷转移到正极板上。这种转移使大量电荷集结在靶表面。靶的背面被低速电子束扫描,从而使靶面趋于稳定于阴极电位。这种扫描产

生的电流强度反映了光电导层的光强分布模式。

应注意,每次对靶扫描时,根据靶面上各点入射光的强度,电子束都再次把电荷转移到正极板上。实际上,电荷的数量跟光强度的积分成比例。光栅扫描在时间上是周期性的,若把恒定的光量入射到特定点上,则每一扫描周期中通过此点时会产生同样的电荷。因此,使光导摄像管曝光只进行一次单一光栅扫描,想随机地读出数据是不可能的。

如同任何物理系统那样,光导摄像管有一个可被光导电层接受的光强上限。若有过多的光入射到传感器一个固定部分,则附近区域的其他电子也被激发。这种现象称图像浮散,它表明了图像中最大光强区域。

光导摄像管的另一个重要概念是当电子束清除电荷时,它不可能清除全部电荷,剩余电荷按指数衰减。这种现象称滞后,其程度与摄像机的响应速度有关。这种滞后的物理现象在观察一个运动物体时看得很清楚。此外,若所观察的物体进入摄像机视场内并停止时,在获得物体精确图像之前必须等物体静止下来。

北美洲使用的 RS-170 标准规定 525 行 60Hz 的电视制式。同线式扫描器件一样,光栅扫描器件以序贯成串行方式转换光学数据。因此,在视场内给定点周围的信息可在一定速率下周期地检测出来,但不能随机获取。在标准电视摄像机的情况下,摄像机光敏面上每个强度点被检测一次的时间间隔为 33.3ms。在许多应用中这种时间延误不严重,但在其他情况下这种间隔长度将不允许。在大部分机器人应用中,1~10s 的周期时间是很平常的,对机器人视觉处理需要的附加时间或许是可接受的。当前大多数可得到的视觉系统能在每秒中提供 5 个视觉信息处理周期,故附加的 200ms 无关紧要。然而,在少部分装置中,装置的机械手部分的周期约为 1s,那么,对视觉处理来说附加的 200ms 将会有重要影响。在诸如半导体组装线的应用中,200ms 延迟时间是不允许的,因为这样的附加时间将使生产速度降低到无利润水平。

光导摄像传感器不是理想的光栅扫描器件,但光栅扫描摄像机制作成本低(例如,摄像机仅需约 200 美元)。当然,采用普通电视监测器这样的简单机构进行景物观察也相当便宜。

随机存取扫描光电倍增管(析像器)也可应用,但光电器件制作成本很高(仅倍增管约 1000 美元),且由于要求随机访问,致使控制电路复杂。这种析像管不依赖惯用的光栅扫描方式,而可采用螺旋扫描或径向扫描。观察这种器件的输出要求有接收光栅和随机存取输入功能的高价监测器,该种监视器应具有显示模式转换开关。

除光导摄像管摄像机外,还有几种固态摄像机(例如,光电二极管和电荷耦合器件摄像机)。固态摄像机制作方式与大规模集成电路类似。传感器元件本身与光导摄像机中的光敏元件有很大的差别,但阵列仍然是以序列或光栅方式存取。因此,固态摄像机在无存取时间这一点上优于光导摄像管摄像机。固态阵列与光导摄像管摄像机相比,前者的固有噪声低,但也相当昂贵。因此,在选定摄像机作特殊应用时,必须在两种摄像机之间仔细考虑性能价格比。许多应用由于重量和噪声的因素而要求应用固态传感器。若必须把摄像机装在机器人末端操纵装置上或附近时,考虑上述因素特别重要。

二维阵列(类似于线性阵列)可采用 CCD(电荷耦合器件)或 CID(电荷注入器件)技术构成。这两种传感器都是基于 MOS(金属氧化物半导体)晶体管技术。由于晶体管的空间离散排列,故这些器件在水平和垂直方向上具有有限数目的单元。固态阵列传感器也是一种积分探测器,因而它的灵敏度跟曝光时间成比例。

如何由二维阵列获得视频信号?在 CCD 中应用最多的技术是帧转移(FT)结构。FT 技术通过曝露在光中的成像区域,产生与光强的积分成比例的电荷。同时,器件上具有存贮单元数目与成像区域敏感单元数目相同的存贮区域。在成像区域曝光的“帧积分”时间里,在阵列中不同传感器位置聚集电荷。经过适当的曝光,在第

二帧前,这些电荷在时钟控制下传送到存贮区域(存贮区域对光有屏蔽作用)。每行数据按照序列方式移动,转移寄存器在此过程中被利用。当成像区域再次被曝光以获得下一帧图像数据时,上帧的电荷分布图利用读出寄存器可从存贮部位读出,这种读出寄存器按照转移寄存器的类似方式操作。

与 CCD 器件相比,CID 摄像机可以认为是由按照行和列方式排列的光敏传感器的矩阵所构成。与 CCD 技术相反,尽管 CID 摄像机大量执行过程依赖于与光栅技术相容的扫描,但每个传感器可随机寻址。每个传感器读出后,该单元被复位并开始为下帧进行光积分。CID 不利用 CCD 阵列的帧传送结构,故在表示图像的电信号和 CID 器件积累电荷的读出之间无滞后现象。

固态摄像机也存在图像浮散现象。在这种情况下,从一个图像的极端明亮部分产生的电荷传播到附近单元,因为位于明亮部位中的那些单元已达到饱和。由于这种电荷移动到附近位置,因而导致发送到视觉系统的错误信息。一般情况下,CID 传感器比 CCD 传感器对图像浮散现象有较小的敏感性。表 26.1 列出了用于获取图像以实现摄像功能的三种主要技术的简单对比。注意,从 1~3 的次序中 1 代表最佳性能。

表 26.1 摄像机技术性能的简单对比

特征/规格	光导摄像管摄像机	CCD	CID
分辨率	1	2	2
灵敏度(光强级)	1	2	3
速度	3	2	1
图像浮散	3	2	1
尺寸	2	1	1
可靠性	2	1	1
成本(当前)	1	2	3
成本(未来)	2	1	3

### 26.3.1 摄像机转移特性

电视摄像机(管式或固态式)的转移特性由下式给出的参数 $\gamma$ 确定:

$$\gamma = \log(I/I_w)/\log(E/E_w)$$

式中, $I$ 表示来自传感器的信号电流强度, $E$ 是入射光在光电导器件上的照度, $I_w$ 和 $E_w$ 分别是信号和照度的参照值。

由于采用其值不等于1的 $\gamma$ ,图像阴暗部分的对比度被压缩,而明亮部分被扩大。大部分电视摄像机的设计都用 $\gamma=0.45$ 。这是用于观察景物输出的CCTV监视器自然特性的结果。通常,这种监视器的 $\gamma \geq 2$ 。因此,若摄像机调整为反极性(即 $\gamma=0.45$ ),则监视器上的图像会使眼睛感到舒适。但是,当图像令人感到舒适时,提供给计算机的信号包含不正确的信息,这就是为什么在视觉应用中对景物成像需使用其值为1的 $\gamma$ 参数的摄像机的重要原因。

### 26.3.2 光栅扫描

由上可知,光导摄像管中的电子束以光栅方式扫描光敏元件。图26.6说明为什么通过光栅扫描能在电视显示屏上看到物体。检测图像表明,电子束从左上边开始通过管面以略向下的角度直到右边。一旦到达这个位置,它就很快反向运动到左边,并再一次扫描到右边。

上述过程确定了图像怎样在显示屏或电视屏幕上重建。一帧图像由两场组成:奇数场与偶数场。这种光栅扫描称为隔行扫描。在这种扫描中,首先扫描偶数行,然后扫描奇数行,再扫描偶数行,以此类推。两个场的隔行扫描允许运动物体的图像显示时闪烁减小。

电视信号标准跟电视摄像机输出及其在显示屏和电视屏幕上重建方式有关。正如前所述,RS-170标准在北美洲通用。光栅扫描处理过程中使用的参数汇总列于表26.2中。对于视频信号,该标

准的格式为 525 行 60Hz。如前述光栅扫描器件产生串行数据,此过程在一定周期内重复。因此视场中特定点的信息可以一定的速率进行周期性的检测,但不可随机读取。

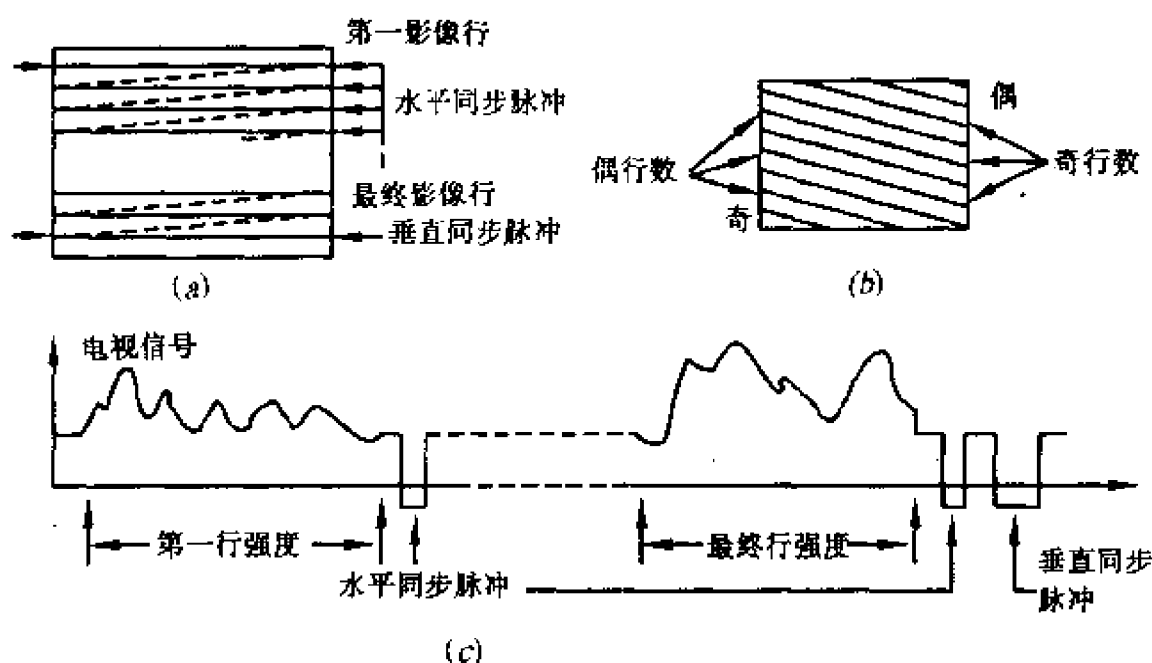


图 26.6 (a) 电视显示屏上光栅扫描过程;  
(b) 显示奇偶场扫描行的隔行扫描光栅放大图;  
(c) 两行模拟视频数据

图 26.6 还示出电视的两行表示法。一个完整的画面由更复杂的波形构成,该波形具有附加的场同步脉冲和确保电子束回扫时间内消隐扫描的消隐脉冲。这里要说明的是,不论什么类型的摄像机对应于帧中(奇或偶场)各行的电信号均如图 26.6 所示,其参数在表 26.2 中给定。

表 26.2 美国黑白电视标准 RS-170 关于光栅扫描的技术条件

参 数	数 值
帧的纵横尺寸比 (宽度/高度)	4/3
每帧行数	525

续表

参 数	数 值
行频率	15.75kHz
行时间	63.5 $\mu$ s
水平回扫时间	10 $\mu$ s
场频率	60Hz
垂直回扫	每场 20 行

### 26.3.3 图像拍摄时间

跟图像传感器有关的一个重要参数是图像的拍摄时间。图像的拍摄时间可定义为从被拍摄物体处于静止的时刻到表示景象的 RS-170 电视信号含有奇数场和偶数场的时刻。但是,不管采用什么类型的视觉系统,都必须加上存贮图像的时间。

图像拍摄时间取决于传感器和光源的类型。设想一台 CCD 摄像机固定在空间,并拍摄由某种机械设备(例如,X-Y 工作台或传送带)移动到视域内的物体图像。摄像机必须连续扫描。因为必须有调整全部机械运动的时间,故物体停止运动的瞬间不与场的开始同步。此外,正如前述,帧转移 CCD 摄像机把图像转移到存贮区域,这区域只有当下一个图像区域被扫描时才能读出。由图 26.7 可看出,在最坏情况下用 CCD 摄像机进行图像拍摄的最长时间为 83.3ms。还可明显地看出,若物体在至少三场时间内处于静止状态(足以读出自帧转移系统的任何无效电视数据),那么,在两场时间内能拍摄出图像(或 33.3ms)。也就是说,摄像机获得的数据在三场时间之后有效,拍摄时间是获得奇和偶数场需要的时间。

这种分析方法也适用于光导摄像管,但必须考虑滞后时间。CID 摄像机没有帧转移结构,因此,一旦图像趋于固定,电视信号立即可以利用。在最坏情况下图像拍摄时间为三场或 50.1ms。



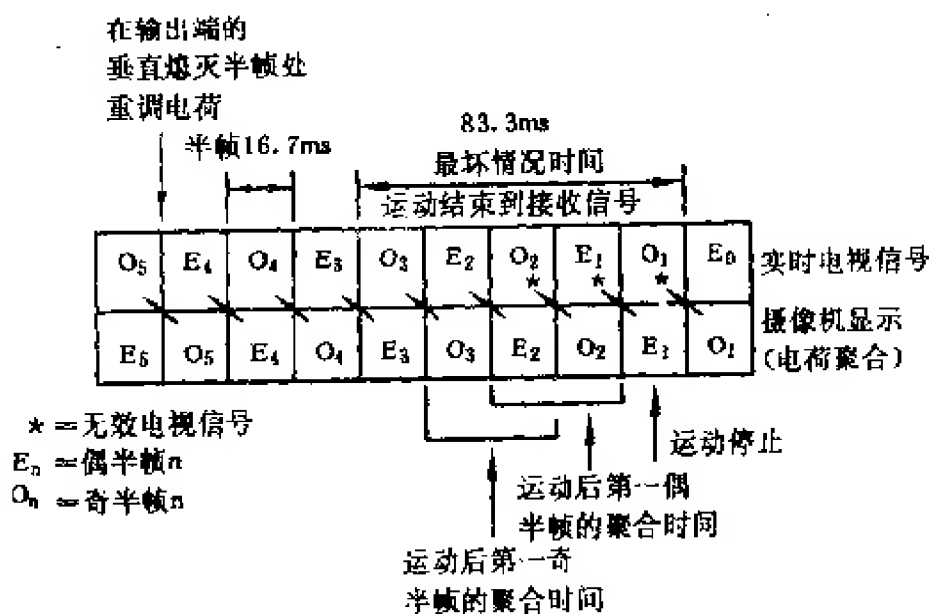
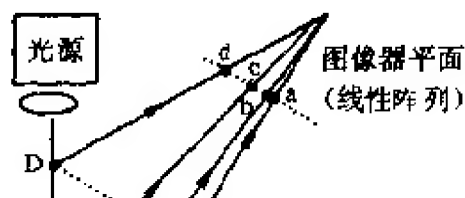


图 26.7 CCD 摄像机在物体停止运动时间内的图像拍摄

## 26.4 立体传感器

提供三维信息的立体传感器, 目前还不能作为标准产品供应市场。现在已有装置可以用来测量物体表面的三维形状和位置。



的物体使光线  $Dd$  与线性阵列的另一端相交。如果与实际高度  $A$ 、 $C$ 、 $D$  相关的数据以及受照的线性阵列的相应单元的地址均已知的話,則可用下述关系来求出未知高度  $B$ 。已知  $b$ (高度为  $B$  的物体反射的光线照射的线性阵列单元): $(AC/AD)/(BC/BD)=(ac/ad)/(bc/bd)$ 。

分辨三维空间特性的一般方法尚未找到,现在尚无机器人实用的通用立体视觉系统。利用结构光可确定物体不同表面的位置,下面 (26.7) 讨论照明度时将就这个问题作详细论述。

### 26.5 图 像 显 示

目前,机器人系统的大部分视觉还不是立体型,故这里仅讨论电视显示屏上图像的表示方法。两个变量的图形亮度函数能很好地描述图像。两个空间变量  $(x,y)$  的实函数  $I(x,y)$  与落在光电靶上的光强相对应。亮度函数用于表示图像;如图 26.9 所示。

$I(x,y)$  是一个理想化的表示图像的函数,它没有考虑通常出现的固有失真,例如,透镜几何像差、光源和扫描仪之间的拍频和景物照明度中的噪声。更完善的图像描述如下:

$$V(x,y) = I(x,y)R(x,y) \tag{26.1}$$

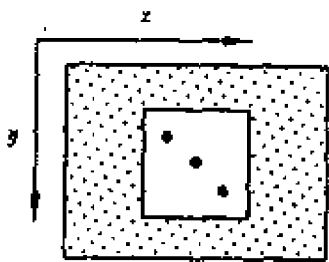


图 26.9 图像亮度函数  $I(x,y)$   
(图中示出立方体的一侧)

式中,  $V(x,y)$  是光导摄像管表面接收的视觉或电视数据。在这种情况下,函数  $I(x,y)$  表示由于某种入射光源(例如可见光)产生的对应于物理照明度的照明度函数。若用反射光成像,则  $R(x,y)$  表示反射函数;若物体能被穿透照射,则表示透射函数。通常,  $R(x,y)$  包含对机器人视觉系统来说很重要的信息承载部分。因此,常常把照射源设计成恒量[即,  $I(x,y)=k$ ], 故在式 (26.1) 中测定的信号  $V(x,y)$  与要求的图像

通常,  $R(x,y)$  包含对机器人视觉系统来说很重要的信息承载部分。因此,常常把照射源设计成恒量[即,  $I(x,y)=k$ ], 故在式 (26.1) 中测定的信号  $V(x,y)$  与要求的图像

函数  $R(x, y)$  密切匹配。图像照明度  $I(x, y)$  可以调整, 以便利用景物的固有特性。例如, 人们可用红色光照射视场以便突出景物中的某些“红色”部分和抑制其他的“较少红色”特征。把一个红色滤色器放在成像透镜前也能达到同样的效果。也可设计其他照明的变化来照射景物的一部分。例如, 用直线光照射景物时, 以只把观察的边缘或视场的某些方面成像。这种由国家标准局开发的用于机器人的结构式视觉系统, 如图 26.10 所示, 已有几种商品 (见图 27.11)。

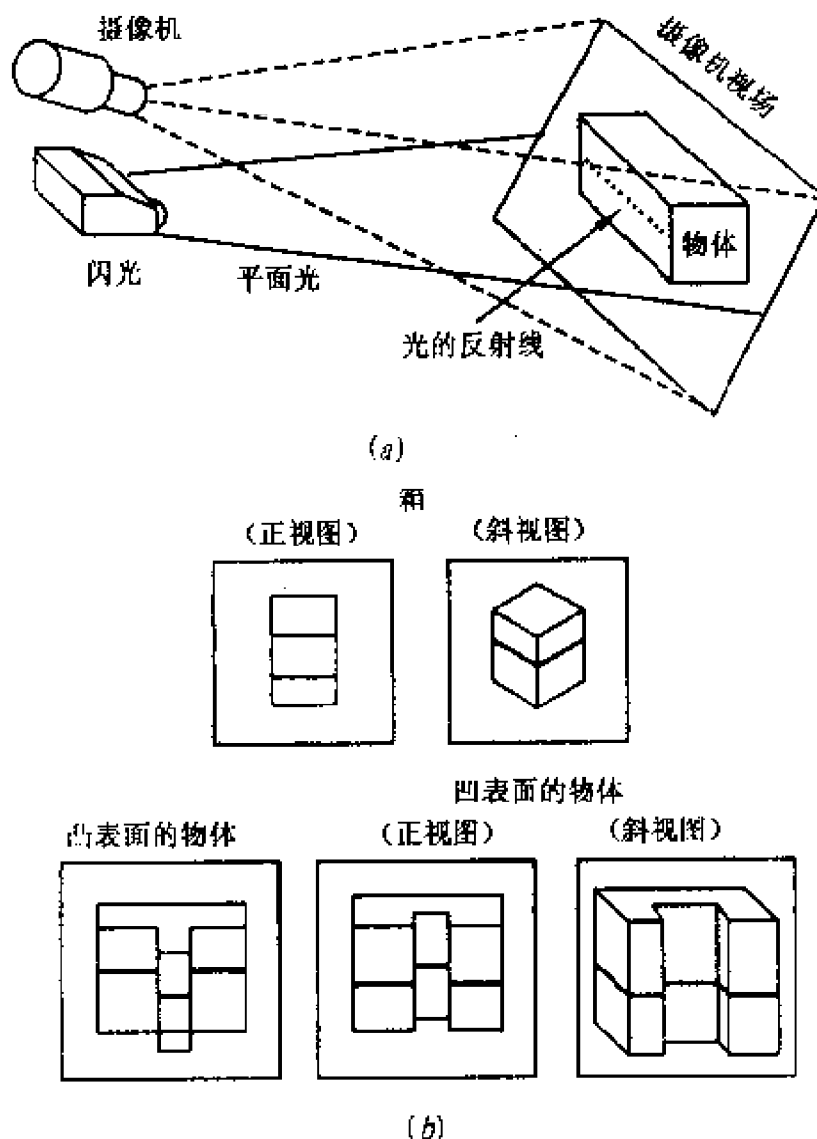


图 26.10 (a) NBS 机器人视觉系统用结构光成像;

(b) 对箱子和升高与压低方面物体用平面光形成的物体和线段图形例

式(26.1)中的图像函数  $V(x, y)$  表示亮度的连续测量, 作为横向和纵向空间变量  $x$  和  $y$  的函数。图 26.9 中,  $x$  轴是从左至右取向, 而  $y$  轴则是由上而下取向。这种取向来自电视的光栅扫描技术, 其扫描进程是从左上至右下。这种电视类型的图像扫描仪自然地使  $y$  轴数字化, 因为光栅扫描只产生一个个的横向扫描线。美国标准有 525 条横向线。这些横向线中大约 40 行不含有景物的有效图像信息。这 40 行用于定时和同步, 最终可用于有效图像信息的只有约 485 行。 $y$  轴的自然量化可扩展到  $x$  轴, 从而使区域的亮度分量在空间中离散的点确定。如几乎所有的机器人视觉系统一样, 图像以数字的方式处理有非常明显的优点。除了  $x$  和  $y$  坐标外, 人们将亮度幅度数字化, 从而使整个图像数字化。人们认为这种图像由许多个单独的象元或像素构成, 每个像素的亮度称作灰色等级, 因为光强有一从“黑”到“白”的数值。图 26.11 示出矩形字母“O”像素的典型数字化过程。

因为需要考虑采样速度, 故提出采样亮度问题。成像系统的其他物理组成部分(例如, 透镜和靶)会导致靶上的图像聚焦不佳, 这会引起扫描系统从有限尺寸的孔径中收集信息。这种影响和其他影响都会限制空间分辨率, 通常到一定程度而相对于图像元件的取样还不致于产生问题(即不会违反 *Nyquist* 采样定律)。

像素数据的量用于表示图像的变化。虽然从光栅扫描图像可得到的是 525 行, 但  $x$  和  $y$  轴典型数字化是从 64~512 像素。用来表示  $(x, y)$  大小的数字往往选用 2 的整数次方, 通常小于全分辨率的表达式就足够了。这些判定需要根据每个具体应用具体分析。因此, 这就需要  $64 \times 64 \sim 512 \times 512$  (即 4096~262144) 像素的矩阵。亮度量化通常是 1~8 位, 故存贮图像要求的存贮量是 4096~2,097,152 位。换算成 8 位字节意味着需要 512~262144 个字节存贮图像。在大部分现有的图像系统中, 图像都是存贮在“视频 RAM”(随机存取存贮器)中, 存放  $128 \times 128 \sim 512 \times 512$  像素。每个像素有 1~8 位。因为这些数据通常是在 16.67ms 内获得, 数据

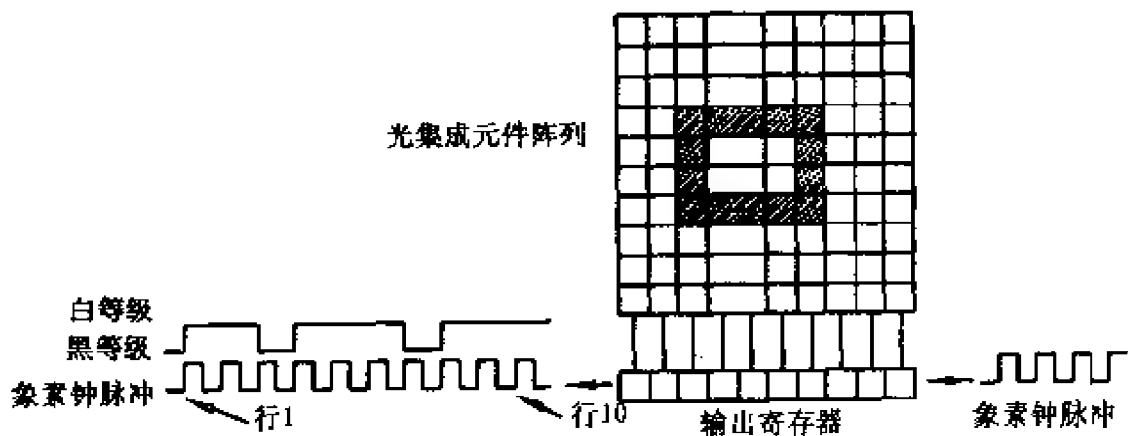


图 26.11 数字图像表示和数据读出  
(输出寄存器的信号示于图中 5 或 6 列)

存贮速度约 2 兆字节/s(512×512 图像在 30 帧/s 下高达 7.8 兆字节/s)。一帧由光导摄像管摄像机扫描的 525 行构成，每帧由两个 262.5 行构成的隔行半帧组成。

## 26.6 硬 件

视觉系统用硬件涉及的领域很广，这里主要论述与标准电视规范有关的问题。

普通电视摄像机是串行信息访问装置，大部分视觉处理系统要求对图像信息随机存取，遇到的问题是存贮像素以备后用。这就需要在如图 26.12 所示的装置中设置一个模拟-数字(A/D)转换器。

像素信息必须经取样并数字化，以供计算机或微处理机利用。A/D 子系统使电视信息的速率与计算机能接收电视信息的速率匹配。处理每半帧 262.5 行信息时，需要取样周期约为 240—300ns(1 行/256 像素=52.5μs/256)。但是，普通微处理器的典型指令时间是 0.1—5μs，故它不能跟上这种速度。这种速度失配可通过更粗的采样进行补偿，并花更多的帧时间积累图像信息。例如，用固定不变的元件和取样孔径，以及每隔一帧只取样一个像素

(假设是隔行光栅),数字化必须恢复到同样半帧,以便收集来自空间点均匀光栅的数据。用这种方法获取图像点的  $256 \times 256$  矩阵,获取图像的时间为  $256 \times 256 / 30 \approx 2185\text{s}$  或  $36\text{min}$ ,显然这是不能接受的。采取每行一个单一象素和每半帧接收 256 个象素,则获取图像要求的时间为  $256 / 30 \approx 8.5\text{s}$ ,这样虽然可接受,但对实际机器人应用仍然太慢。即使每行取 10 次样,以便跟典型微处理器的运算时间匹配,也需要恢复到同样的行数 25 次,故获得图像将需要  $25 / 30 \approx 0.83\text{s}$ ,该值对大多数实际应用仍然过长。解决这个时间问题的方法是使用能存贮全部图像的帧缓冲器。将数据转换成数字量的缓冲器已可供应用。这种装置可使用高级语言和通用图形分析算法,主要用于大型数据点阵列。

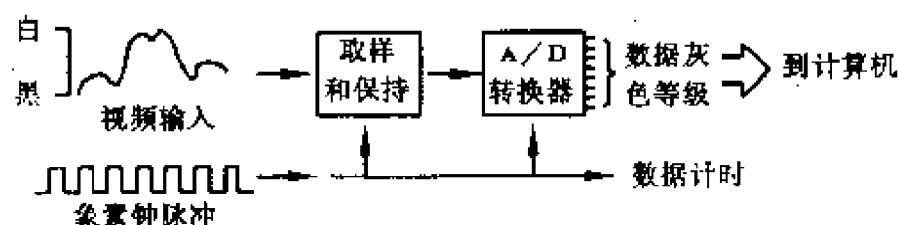


图 26.12 将模拟电视信号转换到数字灰色等级的 A/D 子系统

在许多机器人应用中,机械手抓握物体放到别处,工件的廓影通常足以用来确定机械手的方向。在这些情况下,图像使用二值化,即描述物体所需的象素只需一位便能描述在那一瞬间被观察物体光强的存在与否。使用 8 位字节存贮二值化象素的效率低,通常,将二值化图像紧缩存贮。紧缩存贮容许 8 个象素存贮到每个字节内,故每个帧只需要存贮 8192 个字节。对于灰色级图像,4 位(灰度 16)或 8 位(灰度 256)图像就需要 32~64 千字节,即使使用图像存贮缓冲器,因为必须处理的数据太多,若应用软件处理图像,机器人视觉用图像处理算法必须简单。即使中等复杂算法也需要大量的硬件来进行足够的预处理以便应用通用软件。在某些情况下,硬件算法增强很复杂,不需存贮图像本身,可只使用一组由计算机存取的简化图像参数。

除了考虑获取图像外,还应考虑景物本身的照明对硬件的要求。在简单情况下,应考虑照明与物体的颜色(或表面反射性)相匹配。使用彩色光(或滤色器)产生一定特性,以便跟摄像机的色灵敏度相适应。这就使得在数据到达光敏靶以前,以光速完成某种简单处理。应注意,光速是有限的,约  $0.3048\text{m/ns}$ 。采用斜的和垂直的照明,则可利用阴影和表面异态或消除这些影响。还可使用光阀和频闪观测源“定格(冻结)”运动。因为光导摄像管靶以  $60\text{Hz}$  扫描,运动物体出现运动模糊,故通常使用脉冲光源。其工作原理是,在完成扫描的时间内,光导摄像管累积与图像等效的电信号。摄像机累积其反射光图形时,而脉冲光稳定物体的位置。然后,扫描电路在稍短时间后转移电信号。

采用适当的透射和反射照明,满足计算机装置图像处理的要求。此外,机器人应用中使用国际标准局的结构光学方法是解释上述原理的很好实例。

## 26.7 图像编码

### 26.7.1 灰度图像

开始讨论图像编码最恰当的位置或许是用最简单分布或表示方案——灰度特性曲线,灰度特性曲线是包含来自图像的密度分布的一维阵列。图 26.13 示出一个图像及其灰度分布。假设灰度为 8 位,则灰度级是 256。可看出,灰度特性曲线损失了全部几何信息,这可通过使图像旋转任何角度而灰度分布仍保持不变来说明。在某种意义上,灰度特性曲线实际上也是一种极简单的图像变换,这种灰度特性曲线经常用于评价图像,因为数据极大减少。例如,原始图像要求存贮 65 千字节,而灰度特性曲线只要求  $256 \times 16$  位或 512 个字节,可节省 99% 以上 ( $512/26536$ )。

灰度特性曲线与灰度信息出现的概率有关,可通过检查平均

灰度,最小和最大灰度来确定图像对整个景物是否具有足够的对比度。



(a) 集成电路(原始图像); (b) 集成电路的频率特性曲线

图 26.13 原始图像及其对应的灰度频率曲线

通过测量灰度曲线的特性(如偏差值),可以推导出其他图像特性。灰度曲线的偏差值是灰度值分布“展开”的量度。灰度曲线函数也可用来确定对比度增强函数,从而改进整个图像质量。例如,一个简单线性对比度增强函数可通过放大视频信号和改变偏移量来确定。线性对比度增强函数的数学表达式如下:

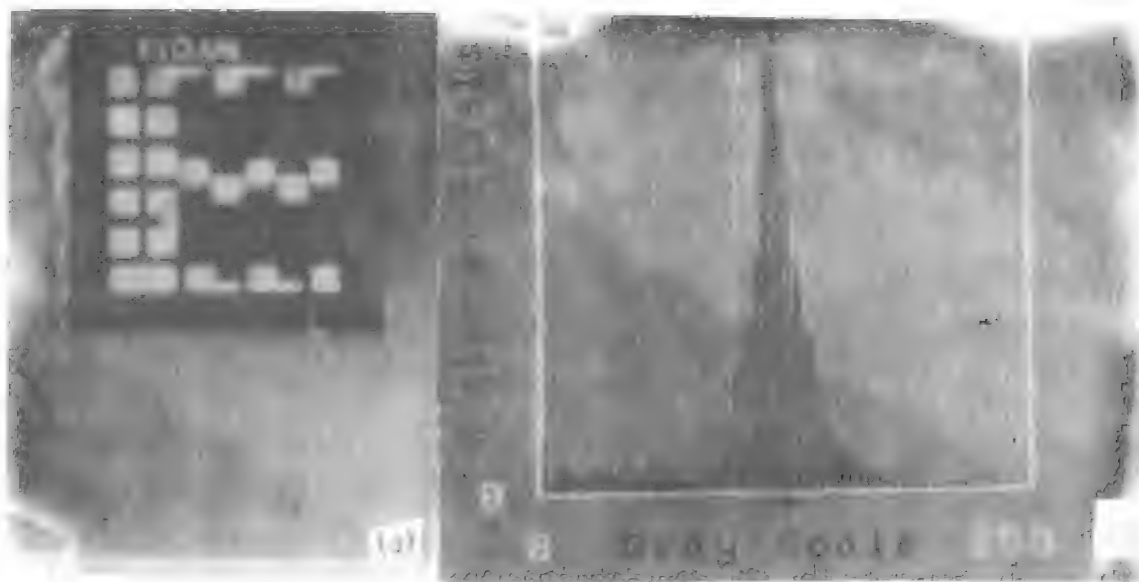
$$\text{新灰度} = K(\text{旧灰度}) + B$$

式中, $K$ =放大或缩小因子; $B$ =偏压或灰度偏移量。图 26.13 和 26.14 说明了线性对比度增强图像的结果。图 26.13(a)示出原始的差对比度图像,图 26.13(b)示出图 26.13(a)对应的频率曲线。图 26.14(a)和(b)分别示出线性对比度增强图像和对应的频率曲线。

检查线性对比度增强函数的方程式,很容易看到,若  $K=-1$ ,且  $B=0$ ,则对比度增强过程变成图像求反(如反转片)。

由频率曲线可推导出更复杂的增强技术,例如,称为均衡著称的程序可应用于图像。观察图 26.13 中的频率曲线可看出,一些





(a) 对比度增强图像: (b) 图(a)的灰度频率曲线

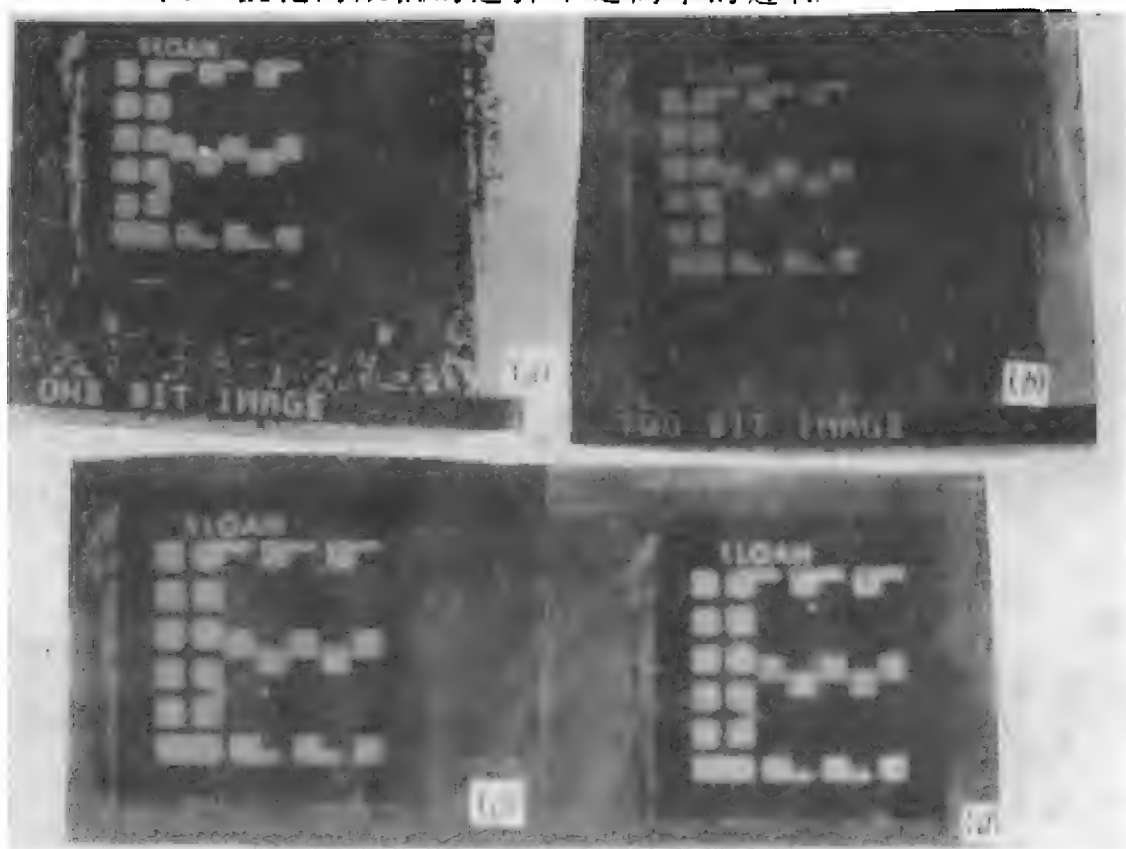
图 26.14 线性对比度增强图像及其对应的灰度曲线特性

灰度发生概率非常低。若将灰度重新分配到那些相对未用过的位上,则可增加有密集图像信息的灰度范围内的对比度,若以损失少量像素出现的区域的像素强度为代价,选择性地增强大部分像素出现的区域,则可获得更均衡的信息分布。本质上,这是扩大现有显示器件的用途,这与 CCTV 摄像机中的自动增益控制系统(AGC)的作用相类似。CCTV 摄像机凭借专用电路测量输入信号的大小,并自动调节系统增益,从而使摄像机输出的电信号幅度达到最大值。值得注意的是,机器人视觉系统(即处理电路)不受这种图像改变的影响。因为处理电路是量化系统,故不受人类视觉系统对比度的限制。

通过评价频率曲线还可获得其他信息。观测透镜聚焦位置函数的灰度范围或偏差量,还可测定景物的整体聚焦性能。实际上,若图像饱和没有发生,用计算机控制的透镜,调节到最大范围可导出自动聚焦程序。

灰度格式的图像数字编码在许多方面来说是最简单的方法,因为这种编码不需要什么智能性的选择。实际上,若人们清除与数字转换器和视频放大链有关的图像强度饱和,则图像表示将反映

待成像的景物。二值化图像表示对于存储器存贮很有效(见 26.7.2), 但二值化门限值的选择不是简单的过程

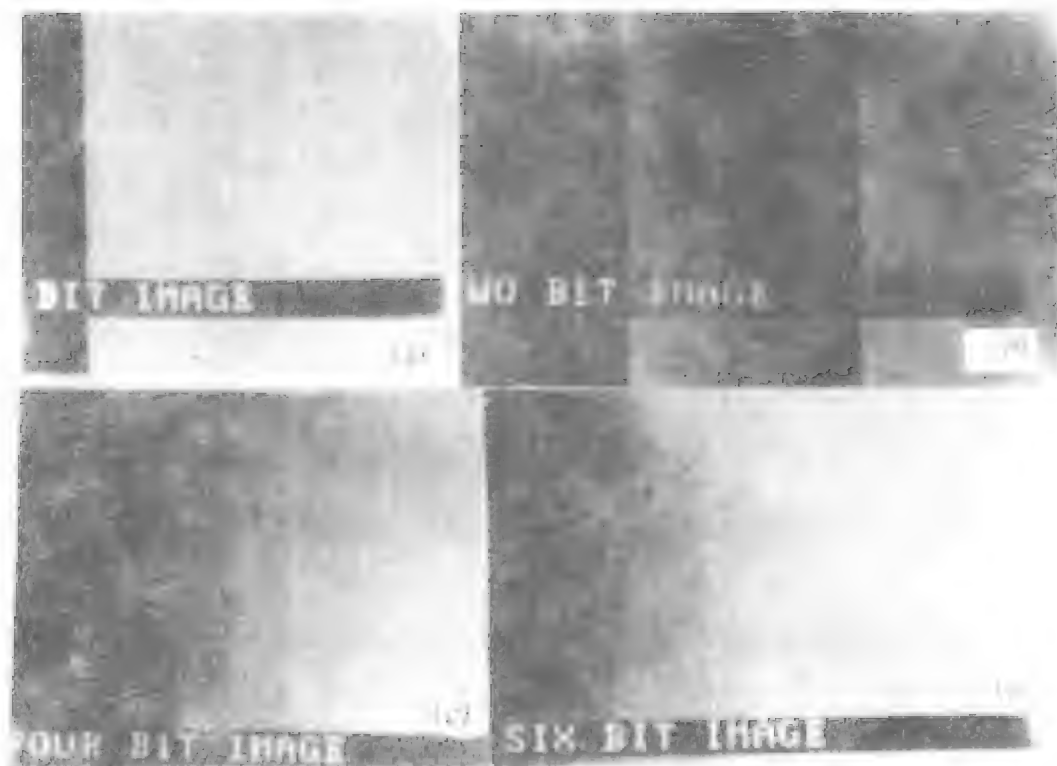


(a) 1-位灰度分辨率; (b) 2-位灰度分辨率;  
(c) 4-位灰度分辨率; (d) 6-位灰度分辨率。

图 26.15 数字化的普通景物实例

灰度编码需要 2~8 位, 产生的灰度范围从 4~256。标准电视机有特定的规格, 仅灰度 10 便可被观众接收, 大部分商业电视系统执行这个标准。这意味着数字化的 3—4 位就足以满足商业视频标准。就人们的视觉系统而论, 4 位图像人看起来比较舒服, 但由于数字化导致灰度明显不连续。在最佳情况下, 人眼可区别 6 位的亮度(64 灰度)。图 26.15 示出普通景物的 1、2、4 和 6 位信息数字化实例。图 26.16 示出说明类似作用的计算机生成的灰度级图像。

灰度图像不用过多地考虑图像装置便可数字化, 但是, 与二值化图像相比, 存贮量要求远比二值化图像所需容量大得多, 而且, 处理灰度图像的算法通常更为复杂, 并且需要耗费更多的时间。



(a) 1-位灰度分辨率；(b) 2-位灰度分辨率；  
(c) 4-位灰度分辨率；(d) 6-位灰度分辨率。

图 26.16 计算机生成灰度级图像

## 26.7.2 二值化图像

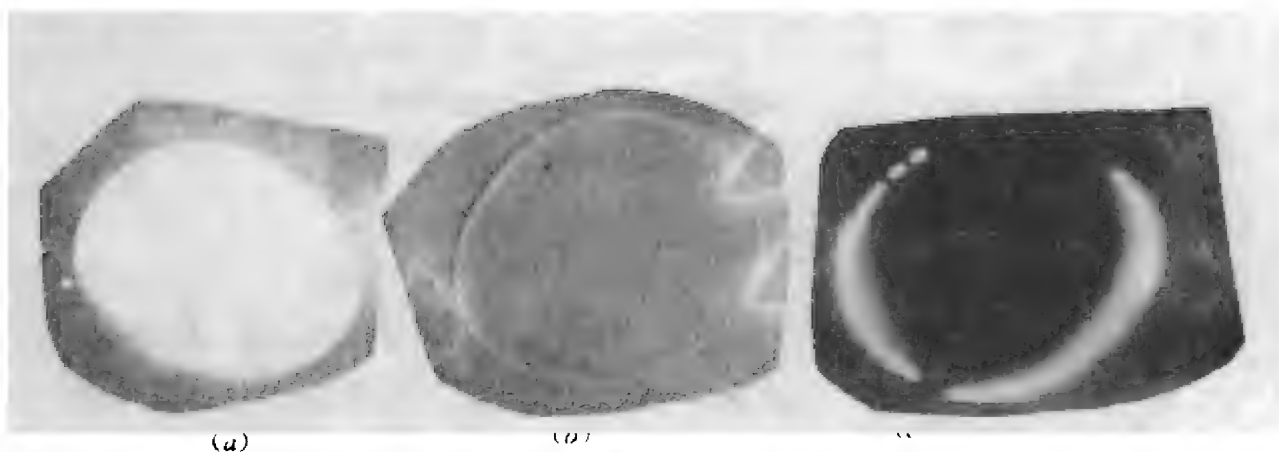
二值化图像编码要求原始图像中每个象素都编成一位代码，故称为二值化图像。在最简单的形式中，整个场景使用一个固定的阈值。图 26.17 示出这种处理的实例。虽然，二值化图像给人以舒适的感觉，且其内涵容易识别，但是，图像本身没有得到很好的数字化，因为二值图像有参差不齐或不成比例的黑—白区域分布。图中被摄景物是从一边照射，故图中出现明显的阴影，并且选定的二值化图像的阈值不合适。

在使用这种二值化人物图像时，要承认这样的事实：即在光照条件下用摄像机拍摄图像时，单个的阈值是不够的。给定照明度，就可用自适应的阈值，即阈值随象素所在区域的不同而变。将局部



图 26.17 二值化描写人物图像

平均光强作为阈值就是一种自适应阈值法。图 26.18 示出应用这种方法的图像。



(a) 原始灰度图像; (b) 具有减去的  $3 \times 3$  像素局部平均原始图像;

(c) 具有变换成黑色(其他全部值为白色)的灰度值为 124 到 132 的数字化图像

图 26.18 采用局部平均光强作为二值化阈值数字化图像

由于二值化图像编码降低了对存贮器容量的要求,也简化了处理 1 位像素时的算法,故很多商品化视觉产品的生产用二值化图像识别和定位物体,而一般还没有用到灰度级图像。这意味着现代机器人视觉系统中大多数使用的是形状和几何因数,而不是灰

度编码参数。

26.7.3 游程长度码

图像的灰度和二值化码是图像编码的直接方法,因为在这两种系统中均运用 $(x,y)$ 坐标和对应的光强信息。最简单形式就是强值阵列,该阵列的数目与图像中象素的数目一样。“数据结构”这一术语是数据结构化表示方法,以便计算机实现和管理。灰度和二值化图像的数据结构在存储器中是一个连续阵列,其索引值和内容与象素位置和光强直接相关。图 26.19 示出 8 位光强变换图像的数据结构。对这种数据结构,象素位置用于计算与象素有关的存储器中的索引。在这个例子中,通过把象素的行数加上 256 乘象素的列数便可计算出项目索引(行索引范围从 0 到 255,而列索引范围从 1 到 256)。阵列中的实际项目值是数字化的 CCTV 电压值,其范围从 0 到 255。二值化图像的数据结构将只需要每象素 1 位而不是每象素 8 位

	索引项	索引值	索引值大小(位)
第一行	1	100	8
	2	102	8
	3	103	8
	⋮	106	8
	⋮	169	8
	⋮	⋮	⋮
第二行	256	⋮	⋮
	257	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮
	512	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮
第256行	65281	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮
	65536	⋮	⋮

图 26.19 变换图像的 8 位光强的简单数据结构

索引值 (临界点)	串长	值
1	100	0(黑)
101	2	1(白)
103	50	0
153	3	1
154	25	0
180	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮

图 26.20 二值化扫描宽度编码数据结构

这些直接编码和简单图像压缩原理十分简单,但没有利用图

像结构。若观察上述数据结构,很明显,通常存在一长串具有相同二值化值的像素。在这种情况下,每个像素占一项实际上是存储器的浪费。若只简单地存储转变点及串长度,则可作为图像的非常有效的数据结构。图 26.20 说明“游程长度码”的数据结构。

有很多“斑点”的特定图像,用游程长度码能大幅度减少存储器的需求量。但是,有很多小特征的图像比直接方法需要更多存储器容量。在许多机器人视觉应用中,使用游程长度码能显著地减少存储量。灰度图像也可采用类似上述的数据结构成为游程长度码。但是,通常游程长度和存储量的节省都没有二值化图像的长和多。

### 26.7.4 差动三相编码

差动三相编码(DDC)能更有效用于灰度图像编码。这种编码技术使用一个像素和前面像素之间的光强差。对于一般景物,两个连续像素之间的差别不很大(约在 25%),所以,记录这种差别的编码所需位数要比记录整个光强的编码少两位。图 26.21 示出这种编码的数据结构。图 26.19 给图 26.21 提供数据。

索引项	索引值	索引值大小(位)
1	100	8
2	2	6
3	1	6
⋮	3	6
256	63	6
257		8
258		6
⋮		
511		
⋮		
65536		

图 26.21 DDC 用数据结构(每行第一索引值是 8 位,其他的要 6 位)

## 第二十七章 计算机视觉

### 27.1 物体识别和分类

#### 27.1.1 维数压缩

应用二值法或灰度光强编码所需的存储器容量一般是固定的,而且略偏大一点(8-65 千字节或更多)。用于适当的图像时,游程长度码和 DDC 通常采用压缩存储。这几类存储方式仍是较直接的,因为编码的象素值与提供的象素值相同,用于复现图像的数据没有经过处理。在某种意义上,图像已存储在照相存储器中。照相存储器不能灵活地使用信息。维数压缩这种编码方案强有力地弥补其它方式缺少智能处理这一缺陷。一旦获得图像的全部数据,使用象素是为了表达画面内容而非仅仅表达象素的排列。图像内容的描述通常就是对图像视野内物体的简单描述。例如,放在桌上的蛋的方位可作如下描述

“蛋位于  $(x, y)$

蛋按照角度  $\theta$  取向

蛋最短直径为  $d$ 。”

这种对蛋位置的结构描述显然比对象素描述更有效,并给出大大压缩了信息。但是,若离开这个举例的范围,这种描述则毫无意义,而用象素描述则能被普遍地理解。

在所有环境下的通用的维数压缩方法不存在,但是,也有一些方法在一定环境下能解决问题。这将在下面讨论。

### 27.1.2 图像分割

维数压缩概念隐含着待处理图像必须在特殊区域内。自动化通用视觉系统的开发是一个很遥远的梦想,目前只能开发某种具体应用领域的高性能系统。

为了加深对这种高性能系统的了解,必须弄清图像的维数压缩是形成高性能视觉系统的一个完整部分。若要求这些系统很完善地以尖端技术处理所有像素,则受到大量的计算时间和专用硬件的限制。通过压缩图像的维数,只剩下几个显著的特征,然后以较长的时间评价这些特征。为了促进这种维数压缩,我们必须开发某种机械结构来隔离“有意义区域”(ROI)。ROI的隔离一般称作图像分割。

图像分割可用许多不同技术完成,常用的方法有:颜色或灰度;边缘检测;特征;区域划分和连通性。

#### (1) 颜色或灰度

为了分析,通常将所用物体的颜色与其他物体的颜色分开。在图像传感器的光路上采用适当的光源和滤色器,通过对要求出现的景物部位加上强光照射可实现图像分割。

灰度分级也经常用于图像分割。例如,蛋表面反射回来的光强可用于确定蛋与其他景物分离的 ROI(有意义区域)。普遍用于机器人视觉系统的几种技术是通过对不透光物体背后照明的廓影,和用讯光照明一个待分析的景物,从而使物体很明显地与背景区分开。

#### (2) 边缘检测

图像分割的另一个普遍而有效的方法是边缘检测。通常,边缘是指图像中灰度有较大空间变化的那些部分,并非所有这些较大空间变化的区域都包含边缘。例如,在一个具有“盐和辣椒”噪声信息很高的景物中,灰度的空间变化很高,但在景物中却没有实际对应的边缘。然而,假设成像系统是仔细建立起来的,则“边缘突出”



功能的利用通常对确定边缘有用,并可用于隔离出一个重要的物体。

边缘检测有多种方法,这里仅考虑一些较简单的算法:一阶差/一维方法;Sobel 运算;对比运算。

每一种运算至少要求二个像素,故用图 27.1 所示局部子图像。该局部子图像矩阵中,A 到 I 是灰度值[即,局部图像的 $I(x,y)$ 值]。E 表示研究的像素点的位置 $(x,y)$ ,A 到 D 和 F 到 I 是 E 的相邻点。

A	B	C
D	E	F
G	H	I

图 27.1 局部子图像定义

一阶差/一维运算是下述一般类型的运算

$$\text{边缘 } 1 = |I - E| + |E - A|$$

$$\text{边缘 } 2 = |F - E| + |E - D|$$

$$\text{边缘 } 3 = |H - E| + |E - B|$$

边缘 1 计算在“西北:东南”方向的一阶差函数。这个特定的函数对垂直于计算出的方向界面最敏感,并且基本上仅算出边界在一个空间方向上的延伸范围。函数边缘 2 到边缘 3 计算出类似的一维界面特性。图 27.2 示出这种运算的方向性偏差的影响。

Sobel 运算包括如下两个方向的边缘信息:

$$\text{边缘} = ((A + 2B + C - G - 2H - I)^2 + (A + 2D + G - C - 2F - I)^2)^{1/2}$$

平方和平方根的运算很费时,所以通常用绝对值取代平方并完全消除平方根,以修正这一计算式。Sobel 和修正的 Sobel 计算式的应用如图 27.3 所示。

### (3) 对比计算

边缘检测的另一种方法是利用如下相对差计算

$$\text{边缘} = E - \frac{A + B + C + D + F + G + H + I}{8}$$

这个计算式将中心像素的灰度和周围像素的灰度进行对比。这里,



(a) 原始灰度图像；(b) 对原始图像电路；

(c) 边缘 2 水平边；(d) 边缘 3 垂直边

图 27.2 两个图像上一维边缘运算的实例



(a) 原始图像；(b) 应用修正 Sobel 算子边缘检测的结果；(c) 应用 Sobel 算子边缘检测的结果

(c) 应用于(a)图像的修正 Sobel 计算式：

(d) 在(b)和(c)部分图像之间的有限差

图 27.3 Sobel 和修正的 Sobel 运算的实例

不论相邻像素灰度的分布如何，只考虑中心像素与其相邻像素之间的相对差，如图 27.4 所示。

用上述边缘计算式可简化图像分割。例如，假如边缘的信息已



图 27.4 (a) 原始 8 位图像; (b) 应用于偏置

128 以避免负数的原始图像的对比计算;

(c) 是图(b)的灰度频率曲线; (d) 变换到黑(其余值全是白)的 124 到 132 灰度值的图(b)的二进制图像

获得,则重要物体的大小范围就可以确定。上面定义的界面检测函数,图像被扫描时这些函数具有能连续计算的功能(即,它们对随机存取图像内容的需要最少)。这种计算的缺点是只能表征边缘点的特征,而不能表征边缘的特征。因为位于边缘的点可彼此独立,它们之间没有明显的联系,故边缘特征很重要。

连续或顺序存取边缘的算法和随机存取边缘跟踪的方法均可用于图像分割,这种方法是轮廓跟踪法。

#### (4) 轮廓跟踪法

轮廓跟踪方法的特点是跟踪检测边缘。物体的边缘用二值化方法可以从背景中分离出来。轮廓跟踪具体算法如下:

在物体和背景图像中取出相邻两个象素,该象素可能在物体(区域内)中或背景上(区域外),也可能一个是背景(区域外,标记为 0),另一个为物体(区域内,标记为 X)。

若当时点在区域内部,即两个检测象素在内部,转向左边,直到区域消失为止。

若当时点在区域外部,即两个检测象素在外部,转向右边直到

进入区域为止。

若当时点不确定,即一个检测像素在区域内部,另一个在外部,则向前移动。

这个过程可用图表解释如下(“×”表示区域内部的像素,“o”表示区域外部的像素。“×”和“o”仅是现时讨论的唯一两个像素)。

$\begin{array}{c} \times \\ \text{---} \rightarrow \\ o \end{array}$  ; 不确定  $\text{---} \rightarrow$  向前移动一步,并检测下二个像素。

$\begin{array}{c} o \\ \text{---} \rightarrow \\ \times \end{array}$  ; 不确定  $\text{---} \rightarrow$  向前移动一步,并检测下二个像素。

$\begin{array}{c} o \\ \text{---} \downarrow \\ o \end{array}$  ; 物体外部  $\text{---} \rightarrow$  向右转,并检测下二个像素。

$\begin{array}{c} \times \\ \text{---} \uparrow \\ \times \end{array}$  ; 物体内部  $\text{---} \rightarrow$  向左转,并检测下二个像素。

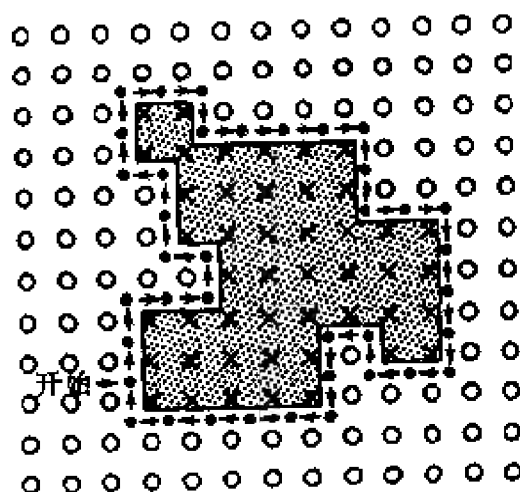


图 27.5 地面跟踪的实例(“×”表示一个内部像素,“o”表示一个外部像素。阴影区域是物体的二进制图像。)

图 27.5 示出轮廓跟踪法的一个实例。在该例中开始的方向是在坐标位置(3,9)向右。箭头指跟踪的地面路径。

这种轮廓跟踪法方法能很好地跟踪密闭区域,也能跟踪地面中存在的任何凹角和裂缝。要再次强调的是,适当的原始景物照明有助于以上算法更好地完成。

### 27.1.3 物体描述、分类和识别

前面叙述的分割方式不是唯一的,但经常用它们分离物体。一旦物体由景物的外部信息分离出来,则有许多方法可用于物体的描述、分类和识别。普遍用于描述物体的技术有两种。物体需要用灰度阴影表征其特征时,可用象素映像的方法简单地描述物体。这种方法在空间和光强方面有足够高的象素分辨率。这种描述方法并不特别有效,但对于已知物体和检测物体对比时很有用。

许多情况下物体不需要用灰度描述(即用二值化描述已足够)。在这种情况下,仅凭物体的边缘线和内部孔眼就足以描述。若物体在机械上有不同的稳定态,则要用几种不同的边缘线才能恰当地描述物体。应注意,描述二值化制物体的边缘线,必须有适合于数字形式存贮并备以后参考的数据结构。一个特别简单的数据结构是物体边缘线的 $(x, y)$ 坐标的有序排列,但这种结构不够有效。

另一个有效用于物体边缘线编码的数据结构是链代码。某点代码是该点到下一点的四(或八)个方向的某一方向。图 27.6 说明一个简单物体的这种编码方案。在这个例中使用八个方向,并用“ $\times$ ”表示边缘线上的点。在边缘线上从不同点开始给出不同的链代码,但它们可用软件技术来达到一致。

存贮物体使用灰度或链代码是实践中用于描述物体的最简单方法。但是,描述物体只是问题的一个方面,假设已得到重要物体的“基本图形”,则实际问题是完成对一个新物体的识别。例如,假设表征物体特性的已知部位可知,该部位必须具备一些可测定的和存贮的特性。每一个在机械上处于稳定态的边缘线和灰度图形也必须予以存贮。

还可看出,用于描述物体的简单数据结构的计算需要很长的时间。解决旋转和平移问题需要三维检测和与基本图形匹配。为了减少匹配的复杂性,通常对物体“特征”很少用全面的几何形状

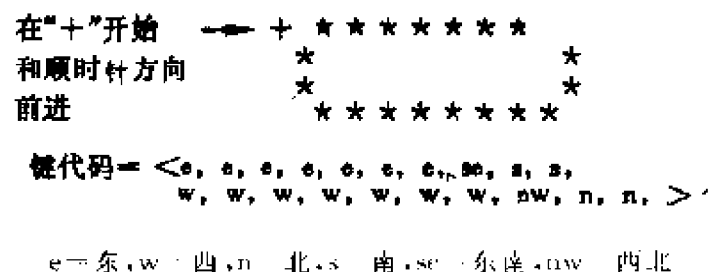


图 27.6 链代码实例(从“+”开始, 象素序列移动确定物体边缘线是由用<>之内所示方向的缩写表示)

描述。

常用的简化参数如下:

- (1) 尺寸大小或面积;
- (2) 投影到  $x$  和  $y$  轴上物体的范围;
- (3) 物体在  $x$  和  $y$  方向长度的比率;
- (4) 物体灰度或二值化重现的重心;
- (5) 几何运动描述;
- (6) 物体中孔眼数。

图 27.7 说明一些通常用于描述物体的形状和几何特征。这些特征明显地减少了表征物体特征需要的维数和减少识别物体的计算时间。由于减少了描述物体的维数, 我们应当付出代价。实际上, 我们将发现这些特征并不是表征物体的唯一特性, 存在许多具有相同参数的不同物体。幸运的是, 在实际机器人应用中, 如果存在这种情况, 我们就增加额外的特征, 以避免模棱两可的情况。

分类物体的一个好的方法是抽取特征矢量(即描述物体的一组测量数据), 然后把这组数据与已知数据对比, 便可根据这两组矢量之间的差别(或误差)判定检测的物体是否与样本物体属于同一类型。显然, 这种方法对于每个稳定态必须这样做。这种处理方法在形式上是大家知道的“最近邻技术”, 它是用于物体分类的许多统计模式识别技术中的一种。不同于许多统计模式识别问题, 大多数机器人视觉问题经常不是统计性质的, 因为系统设计师能对许多处理过程施加控制(即工程师经常能“为自动化设计”)。

排除孔 眼的面积					
内部面积 (孔的面积)					
最长尺寸					
Feret 直径					
宽度					
圆周					
凸圆周					
投影长度					
最大水平弦					

### 导出尺寸测量结果的实例

导出的测量结果	意义
排除孔的面积+孔的面积	特征的总面积
凸圆周/ $\pi$	平均Ferret直径
面积/最长尺寸	在到最长尺寸直角处的平均特征宽度
$\pi \times$ 面积 / 圆周	平均弦长度
$\frac{\pi \times \text{面积}}{4 \times \text{最长尺寸}}$	等效圆柱形体积

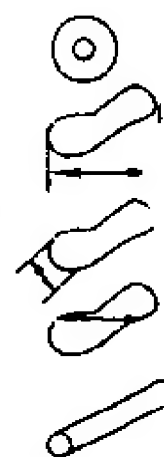


图 27.7 普遍使用的物体形状和几何特征

### (1) 图像对比

在许多应用中,可用一个参考图像(或称标准图像)。参考图像在随后的检测图像中可代表待定位的物体。为了跟接着来的被检测图像对比,参考图像经常用掩模或存储器方式存贮。这种检测通常可描述如下:

$$O(x_0, y_0) = G\{T(x - x_0, y - y_0), t(x, y)\}$$

式中,  $T(x, y)$  = 参考图像;  $t(x, y)$  = 被检测图像;  $(x_0, y_0)$  = 空间平移偏置;  $O(x_0, y_0)$  = 输出响应。  $G\{\cdot\}$  称为比较算符。

通常,  $G\{\cdot\}$  选为线性两维卷积算符。它可定义为

$$G\{\cdot\} = \sum |T(x - x_0, y - y_0) - t(x, y)|$$

它代表参考和作为与被检测图像对应的参考  $(x_0, y_0)$  的空间位置函数的被检测图像绝对差之和。这种技术也是众所周知的“最近邻分类法”, 因为对于点  $t(x, y)$  最靠近的点  $T(x, y)$  有最低的值, 并且是最近的相关点。这种总和是在整个图像区域中完成的, 在该区域中子图像与检测图像的一部分重合。通常, 子图像有空移位移(在  $x$  和  $y$  方向), 因此将其放在整个检测图像的上面。

其他算符也能实现图像对比, 一种最简单的方法称为二值化对比法。正如期望的, 被检测图像和参考图像两者都是二值化图像。这种过程可确定如下:

- 确定一个模板。对二值化制对比法来说, 这通常是对比图像的一部分。应注意, 它可采取直线、正方形、矩形或甚至一组分离的像素方式(像素保持相互之间有固定的空间联系)。

- 模板重叠在检测图像上。选择模板上某一位置作为参考点(例如左上角)。在检测图像的对应点定义为将放置计算结果的坐标。

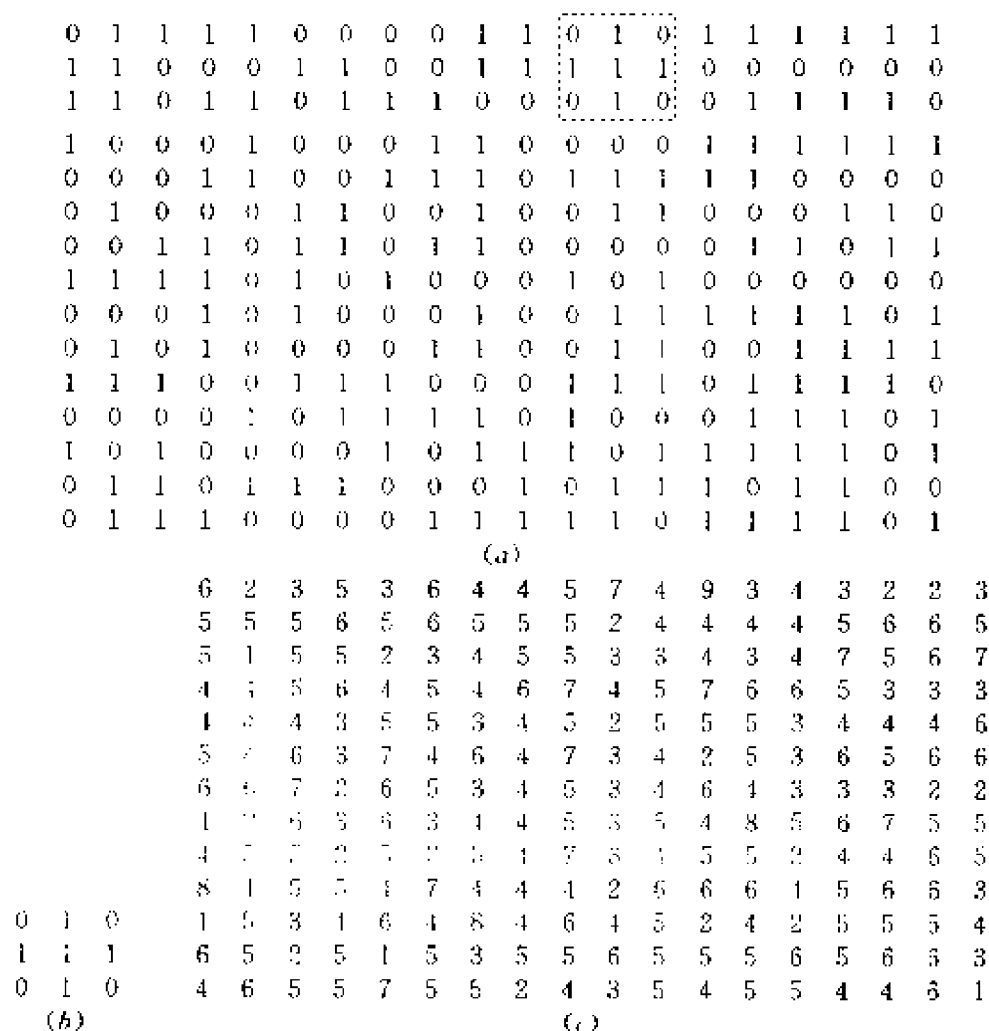
- 计算出与检测图像部分匹配并位于检测图像上模板像素的数目(或百分率)。这种典型计算的方法用于计算每个对应模板和检测图像像素之间完成的互补 XOR 函数的结果的总数。



• 以上计算的值放在与模板的参考点对应位置的合成图像中。

• 重复上述程序直到模板已重叠在整个图像中每个象素位置上。

图 27.8 示出原始二值化图像、一块模板和已经应用二值化对比法处理后的合成图像。由图的(c)部分可以看出,与图像匹配最好的位置有最高值。模板延伸到超过图像时,可补上零。如图27.9中所示。两列 0(但不显示)加到图像的右边,两行 0 加到底部。这样模板的顶部左边界面( $3 \times 3$ )可放在图像的每个象素上。



(a) 二值化图像阵列( $15 \times 20$ ); (b) 二值化模板;  
(c) 二值化对比的输出( $14 \times 19$ )。部分(a)中虚线箱指出已获得的完整模板匹配。

图 27.8 应用于二进制图像的模板匹配实例

二值化模板匹配十分简单,但在实际使用时会出现一些问题。通常图像信息在二值化时被丢失,并且,构成边缘的像素又必须是黑色或白色。因此,精确位置的信息也可能被丢失。此外,图像和模板都是二值化的,用于定义模板的变换过程中,必须有近似相同的阈值和光照条件。因为景物照明的变化可能使检测像点与被用于定义模板时的像点不一样,从而导致不正确的匹配或根本不匹配。

## (2) 模板匹配

使人感兴趣的是,用于二值化对比法的同样程序也可用于完成图像的边缘检测或其他数学运算。这种方法称为模板匹配。在这种情况下,模板(或模型)用于检测图像的某种性能(例如边缘)。例如,若图 27.9 所示的两个模板应用于一个图像,并且在采取的每个像素中获得的两个处理输出的平方和的平方根,则合成图像的边缘被扩大。这些模板如前述 Sobel 算子一样完成同样功能。在这种情况下,模板的参考位置就是中心像素。

1	2	1	1	0	-1
0	0	0	2	0	-2
1	2	1	1	0	-1
第一算符			第二算符		

图 27.9 用于边缘检测的 Sobel 算符的模板

## (3) 灰度图像的相关

用于二值化模板匹配的同样概念也可扩展到灰度图像和模板(或参考子图像)。但是,在这种情况下,图像中会出现特征的高对比度,由于它们可能比与模板匹配的像素更亮,故看起来不像模板。因此,这种相互对比的方法可能不适于独立确定待寻找部位的特征(与参考图像匹配最好的图像部分)。

若用 Fisher 统计相关系数,则可在灰度图像找到给定的不受照度变化影响的灰度模型最佳匹配。我们基本上能根据模型与图像的最大相关值找到物体的特征。相关系数的定义由下式给出:

$$P(x_0, y_0) = \frac{N \sum I_i M - (\sum I_i)(\sum M)}{\sqrt{[N \sum I_i^2 - (\sum I_i)^2][N \sum M^2 - (\sum M)^2]}}$$

式中,  $I_i$  是维数与模板相同的检测图像的子图像;  $M$  是模板或参考子图像;  $N$  是模板中总的象素数目;  $(x_0, y_0)$  是相对于检测图像的模板的空间位置。模板尺寸可以是比检测图像小的任何尺寸 ( $q \times r$ )。

如前所述, 模板移动越过图像。在这种情况下, 除了增加模板相应的灰度外, 还需计算出子图像和模板(和每个的偏差)的平均值。模板及其偏差的平均值都是常数。对以上等式的变动可简化计算。例如, 可修正相关系数, 从而消除分母中求平方根的麻烦。

利用相关系数可推断出一些重要结论: (1) 设值 1 指示正确匹配, 并且, 若小于零的值可忽略, 则在图像上面获得的最大值就能确定最佳匹配的位置。显然, 相关系数越大匹配越好; (2) 若图像中的一个特征部分地被减弱, 相关系数通常仍能识别它及其位置; (3) 被匹配模型图像上的所有点可通过寻找在某一定阈值以上的所有相关系数来发现; (4) 相关系数与亮度线性变化无关也就是, 假设图像的所有象素由下述函数修正:

$$I(x, y)_{new} = aI(x, y) + b$$

对于  $a > 0$  和任意  $b$ , 相关系数不变。参数  $a$  和  $b$  可认为是图像或目标显示器件的增益和偏值。

若选择构造一块模板来确定物体的某种特征(诸如角落或边缘), 可用上述灰度相关技术来发现这些特定特征。在这种情况下, 设想一个左半边为  $q \times r/2$  的 ( $q \times r$ ) 模型, 整体为白色而右半边为黑色。采用这种用灰度相关的模板能找到与从亮到暗转变的边缘类似的图像全部面积。

#### (4) 形态图像处理

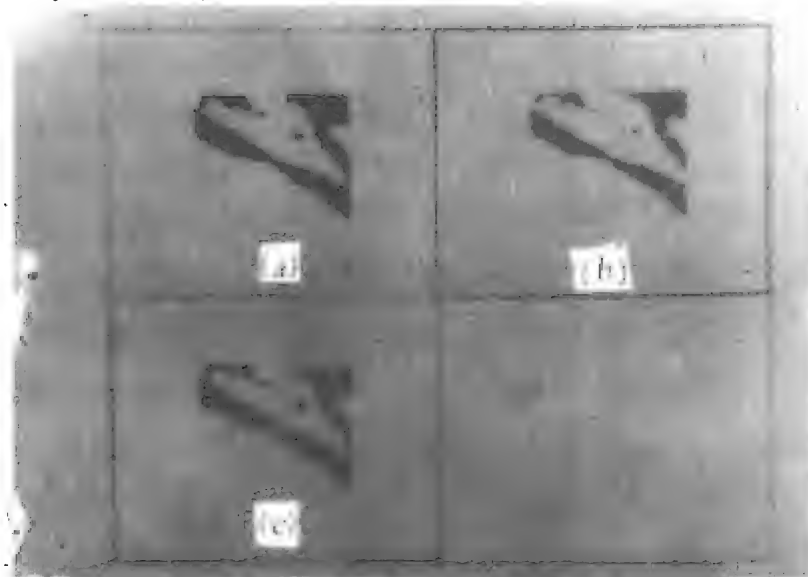
在形态图像处理中, 输出图像被认为是紧接在后面产生的输入图像。本质上, 这种处理可能进行多次(即输出变成输入, 输入变

成紧接在后面产生的输出),从而使图像特征增强,削弱或产生别的变化。这种输入图像的运算由一组对空间特定输入象素及其邻近象素产生影响的规则构成。对于输入象素跟输出图像的象素有相同空间位置时,该规则有价值。形态处理通常应用到二值化图像,它也可用于灰度图像。但是,对每个二值化算符没有等效的灰度算符。

为了扼要说明这类处理,这里分析两种最普通的操作,即膨胀和腐蚀。腐蚀最简单形式是以象素邻域的最小局部区域(例如,  $3 \times 3$  局部区域)取代一个象素。这种操作使明亮物体在表面上的“尺寸”减少,从而变成“缺刻状”(显然,黑暗物体在表面上的尺寸增大)。膨胀的最简单形式是以象素的局部最大区域取代一个象素,从而增大明亮物体的尺寸和减少黑暗物体的尺寸。

下面通过研究一个  $3 \times 3$  的模芯说明形态图像处理过程。在这种情况下,设想围绕中心的象素(以及中心象素)的每个象素是某一传输规则的输入。这种规则产生与中心象素一样放置在空间位置相同的输出图像上输出象素的值。我们可再次考虑移动  $3 \times 3$  全部模芯面积放在输入图像上面,从而完全覆盖输入图像。若我们选择  $3 \times 3$  面积中所有象素的逻辑“与”作为传输规则,那么,只有一个白色象素完全被白色象素包围时输出将为 1。由于它的作用是减少了白色区域的大小,故这就完成了腐蚀操作。若腐蚀时间足够,则图像中的所有白色象素能全部消除。如上所述,膨胀是腐蚀相反过程,且符合象素映像规则采用的逻辑“或”函数。当它用于二值化图像时,白色面积的尺寸增大。图 27.10(a) 示出未处理二值化图像。图 27.10(b) 示出对图 27.10(a) 完成的白色膨胀操作的结果,图 27.10(c) 示出对图 27.10(a) 图像完成的白色腐蚀(或黑色膨胀)的结果。

如果在腐蚀操作之后接着膨胀,则在白色物体之间小的桥接被破坏。这种级联运算称为分解。膨胀之后继之以腐蚀,则会有与上述过程相反的效果和在相邻区域之间的空间闭合。这种级联运



(a) 原始二值化图像；(b) 图(a)中图像的白色扩大的结果；

(c) 图(a)中图像的白色冲洗的结果

图 27.10 形态图像处理的举例

算称为闭合。

许多其他的运算允许填充部分丢失边缘,从而恢复图像的原  
始形状,测量图像的扩展和实际上隔离物体,以及减少它们的维  
数,便可计算景物中特别形状的不同尺寸的物体。

## 27.2 软件设计

机器人应用中的视觉技术还很少,软件给视觉的应用提供了  
方便。实际上,所有视觉系统完成了一些硬件上的算法,软件设计  
实现能轻而易举地使用视觉系统。当前应用的大部分视觉系统,实  
质上只是一些机器人主控制器的外围设备,且由比较简单的指令/  
数据结构产生作用。实际上是给外围视觉设备提供一串或大量指  
令,然后外围设备把数据传回主处理机。一些视觉系统都有它们自  
身从复杂到简练的使用者语言。对大多数视觉系统来说,语言和软  
件设计主要在于对视觉系统外围设备进行控制,而不是算法上的  
实际执行过程。

## 27.3 视觉训练和适应的需要

最初读者可能相信原形图像部分的定义无关紧要,现在读者可能已发觉,定义物体要求的数据量比其他数字数据处理应用的数据量大很多。设想一下充分描述一个物体需要的自由度多样化时,显然,十分需要视觉系统训练,从而使相当数量的数据被视觉系统保留。

由于上述原因,维数压缩显得非常重要。特别是,它们使得用视觉数据来有效的描述成为可能。另一个重要的考虑是系统必须具备处理随时间而变的物体或部件的潜力。例如,载运部件的传送带可能不在小心控制的恒速下运转,从而使得物体不在精确时间间隔内到达。在这种情况下,关于工件到达“动向”的跟踪对有效获取图像和处理数据十分有用。

另一种情况是在半导体器件的组件中,其中一块小片通过固定机连接到基片上。若机器经常有微小偏移,由于小片的位置偏移,使得最后把导线连接到引线架和芯片上时导线小片的成像有位置误差。这种对物体位置的自适应校正对有效处理部件是经常需要的。

## 27.4 工业视觉系统

### 27.4.1 二值化视觉系统

二值化视觉系统仅用图像信息的两个值(0和1),该系统仅利用物体轮廓,必须使用严格控制的光可靠地照射物体的轮廓。通常用背射光,从而使被检测的物体与背景隔离开。二值化图像主要用于工件识别、定位和检测。

从视觉角度来看,二值化视觉装置可认为能操作工件,如同一

个检测器能拾起工件并把它放到光源下,以便进行背射光检测一样。人们可看到一个有限的但非常有用的一组信息,该信息人们可从操作过程中发现。

RI 使用的算法集是二值化视觉系统的一个实例。如同典型器械一样,它允许按照任意角度校准工件。因为可能增大速度,故经常产生扫描宽度编码图像(见 27.5)。

对于先前已处于某种取向的物体,其角度校准已不成问题,但不知道物体的平移位置时,经常用二值化相关技术。二值化相关允许物体位于与最好匹配点相一致的位置(匹配点常用作工件质量的量度)。对于任意取向的工件,这种技术尚未达到实用,因为需要完成三维的相关技术(二维平移,一维旋转)。其他二值化视觉系统经常用于工件检测的所谓“象素计数”。这些系统通常需要数据的空间观察窗,并在这些窗口计数象素。这种方法需要仔细选择窗口,并认真调节,从而确保象素计数的有效性。

#### **27.4.2 灰度视觉系统**

灰度视觉系统通常拍摄 4、6 或 8 位图像,然后对某一特定应用设计简单的算法。例如,灰度模板匹配技术在无背景环境中可用于工件定位。在很多实例中,不允许高度控制的照明,或物体表面具有用于检测物体的可变反射率。灰度模板对比法可用于校准角度的物体定位,是利用物体相对于一个已知“理想”原形的物体的模板差异来判断它与原形的相似性。

#### **27.4.3 结构光学系统**

结构光学方法在许多应用中被证明是很成功的方法(见 27.5)。用背射光照射物体容易分析物体特征。结构光学用隙缝光刻划物体特性,然后在同样照明环境下观察新样品。隙缝光或平面光照射到物体上时,可看到照明度的不同形变和路径偏离,可用于表征物体位置、方向和表面清晰度。除隙缝光外,人们也可使用网

格光和寻找网格图形中的形变,从而表征物体的特性。

#### 27.4.4 字符识别系统

人们经常期望读出工件、包装以及其他物体上的标注或字符。条形码加到被识别的工件上时,就可通过简单的条形码读出器识别工件。字母数字代码是一种和条形码完全不同的代码,任意字符组合的识别直到现在仍是非常困难的图像处理。目前已有多种系统能以高速(15~30 个字符/s)读出的字符组合。

### 27.5 早期机器人视觉系统的实例

早在 1980 年以前就已开发出专供机器人使用的许多视觉系统<sup>[3]</sup>。下面介绍美国国家标准局开发的 GM Consight 系统和由 RI 开发的另一系统<sup>[3]</sup>。

#### 27.5.1 GM Consight-I 系统

七十年代末期,美国通用汽车公司研究所发明了一种在制造装置中安装的能在噪声环境下操作的机器人视觉系统,称 Consight-I 型系统。这种系统能确定传送带上的工件的形状、位置和取向而不需要采用其他技术(例如,利用传送带表面上的荧光涂料)。

图 27.11 示出上述系统的方框图。由图可看出使用一台主计算机可处理装在机器人工作位置上方的固态线性阵列摄像机所检测的工件。有关传送带速度的数据也送到计算机处理。当工件从视觉系统位置移动到机器人位置时,计算机利用视觉和速度数据确定工件的位置、取向和形状,并把这种信息经接口送到机器人控制器。根据这种信息,工件仍在皮带上移动时,机器人便能成功地接近和拾取工件。

必须连续监控传送带的速度。原因是,工厂中常用的传送带没有控制速度的伺服机构,传送带速度应随负载变化、电源电压变化



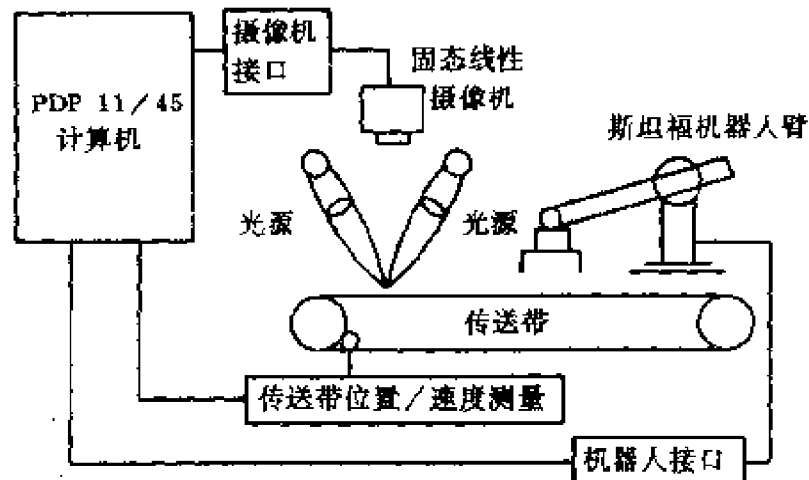


图 27.11 GM Consight-I 型系统

和旋转工件的磨损而作相应调整。机器人必须准确知道工件什么时候到达它的工作位置,故计算机必须掌握皮带的瞬时速度。另外,保持皮带速度变化跟踪与用于获取二维视觉景物的方法有关系(见下述)。

由图 27.12 可看出,线性阵列摄像机在其一维方向(例如,在  $y$  方向)扫描皮带,这是垂直于传送带的运动方向(例如,  $x$  方向)。摄像机记录皮带宽度上 128 个相等间隔点。二维图像可通过指令摄像机在工件移动到特定距离时形成(在记录下一个线性图像以前)。显然,皮带速度的波动会使记录图像变形,通过监控速度可避免发生这种现象,这种监控速度允许在获取两个连续变化的线性图像之间有一个时间间隔,从而补偿皮带速度的非均匀运动。

Consight 系统在无衬度增强技术的情况下是怎样解决不良照明条件的问题? 系统怎样知道工件出现与否? 通过窄条缝隙光可回答这两个问题,就图 27.13 和 27.14 而论,由一细长钨丝灯管和圆柱形透镜组成的光源投射出直线光束越过位于摄像机下面的皮带反射到达摄像机,摄像机正好位于它能接收光束的位置上,故它能感觉到这种光线。摄像机的视场内没物体时,则光没有散射,如图 27.14(a)所示。但是,工件出现在视场内时,物体的三维属性导致光束在反射到摄像机位置以前被遮断部分光束。摄像机从上

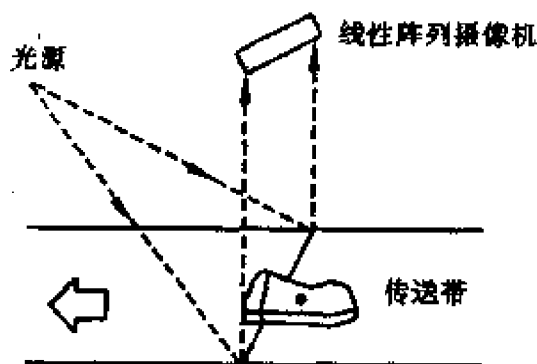


图 27.12 Consight-1 系统内摄像机和光源的构形(基本光学原理)

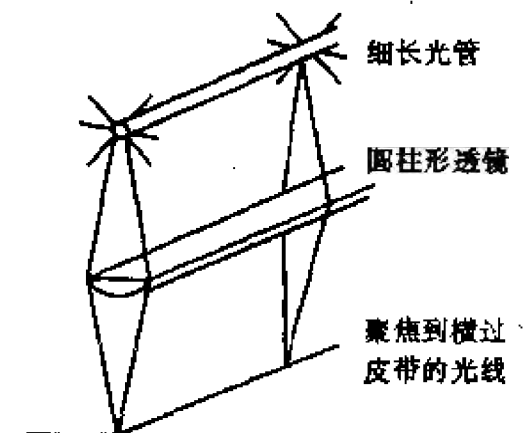
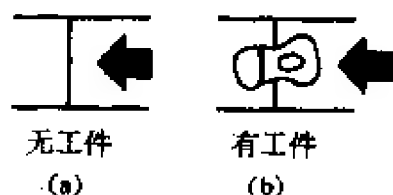


图 27.13 用于 Consight 1 系统的结构(线性)光源

面摄像时,被物体反射的部分光线表现出向下的位移,如图 27.14 (b)所示。因此,只要有物体出现,摄像机都形成黑色图像,反之,无工件出现,即为白色图像。工件移动到传送带下方时,黑色区域改变长度( $y$ )。所以,用摄像机记录的二值化图像由有工件的黑色区域和无工件的白色区域构成。



(a)传送带上无工件时由摄像机观察到的连续光线;  
(b)工件导致横过传送带宽度被遮断的光线

图 27.14 工件的计算机(线性摄像机)视图

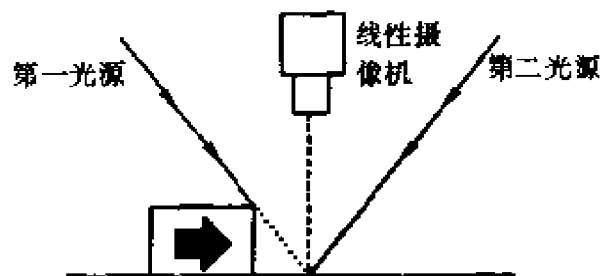


图 27.15 用二束光源阻止阴影

使用这个系统潜在的问题是阴影,如图 27.15 中虚线所示。图中,可观察到工件实际上到达摄像机位置以前,系统就“检测”到工件的前置边缘。

这个问题利用传送带上方在摄像机位置上聚焦的两个或更多线性光源可以解决,如图 27.15 所示。读者可观察到直到工件处在适合位置前,第二光束一直阻止传送带上这个位置变成暗区。

Consight 系统为存贮二维二值化图像采用了扫描宽度编码。摄像机有 128 个像点,存贮图像的代码为 7 位。“代码”中剩余位数用于表示是从亮到暗还是从暗到亮的变化。如前所述,除非被观察的物体有许多孔眼,用扫描宽度代码使数据压缩,使存贮量远比按另一种方式少得多。另外,采用这种技术时,以后的处理时间也有减少。利用 6-联区域算法可完成边缘检测,从而使得像素的四边和对角线的一端获得连通性。

一旦物体的轮廓被确定,工件的类型、位置 and 方向(相对于它的前置边缘)也就确定。为了完成这一工作,抽取和计算了少量的数据。Consight 应用的特征:

- 区域中心(矩心)
- 工件轮廓的最小惯性矩轴
- 从矩心到图像边缘测量点的最大半径点

对一给定的物体来说,把这些特征和其他简单的计算特征与存贮在计算机中的特征对比便可识别待识别的工件。

方向经常是在数据处理中表示工件的特定描述符,它可用多种方法找到,其中包括选定从矩心到图像边缘测量点的最大半径点的惯性矩轴方向。物体处在机器人工作区间时,方向描述符和传送带速度数据被传送到机器人,并指示机器人在什么地方和怎样抓握。在某些情况下,也许需要停止传送带运转一段时间,以使机械手抓握住工件。

使用 Consight 系统的主要问题是它不能处理相互接触的工件。如果发生这种情况,则扫描部件的数目通常比单个工件需要的多。另一方面,在视觉系统存贮器里存贮部件的两个接触工件的特征之间不匹配(例如,“复合物体”通常有较大的总体区域)。在任何一种情况下,都允许不能“识别”的物体一直运动到传送带末端并进入废品箱,从而再参加循环。要注意的是,假定传送带上有多个稳定位置的物体,要求系统获取的特征能加以分割,以对应不同的物体。

GM Consight 系统早已开发成功,美国 GMF 和 Adept 集团在使用。

### 27.5.2 美国国家标准局视觉系统

七十年代末期,美国国家标准局(NB)开发的 NB 视觉系统在 100ms 内能处理图像信息,成本约 8000 美元。以后,系统的响应时间和硬件都有改进,但是,基本技术没有大的变化。

NB 视觉系统的主要硬件由三个部分组成:(1)能产生 16K 像素( $128 \times 128$ )的固态摄像机;(2)能发射平面光,且闪光强度可数字式调整的电子频闪光源;(3)“图像处理”装置。为了理解系统的操作可参考图 27.16。图中没有示出机器人的机械手(特别是机械手的腕)。实际操作中,摄像机和结构光源装在机器人手腕上,处理装置装在机器人自身控制器上或其附近。频闪装置产生平行于腕平面投射的平面光(由接近矢量和  $y$  确定)。摄像机安装在光源的上方并使之向下倾斜(即使之与光平面交叉)。摄像机视场为 36 度,覆盖从抓爪手指内部延伸到一米远距离的区域。假如投射光射到处在这个区域内的物体上,则物体上形成线段的图形,如图 27.17。机器人抓爪移动到物体附近时,这些线段增大并趋向摄像机视场之下。越靠近图像底部,被扫描物体就越接近机器人端部操纵装置。但是,该系统怎样提供定性的信息,从而使机器人抓取物体呢?

为了回答这个问题,设计图 27.18 所示校准图表(从简单的几何设计推导出来)。顶部和右边坐标轴以比特数定标,而底部和左边坐标轴以分别表示摄像机和物体之间  $x$  和  $y$  距离的厘米数定标。例如,若摄像机摄取图 27.19 所示从 (32,64) 比特延伸到 (96,64) 比特的水平线,则产生这条线的物体必定位于离抓爪约 13cm 处而宽度约为 10cm。

图 27.18 中包含的信息存贮在视觉系统的处理装置中,用于确定反射线段上每个点的分布范围和方位角。用三角测量法获得

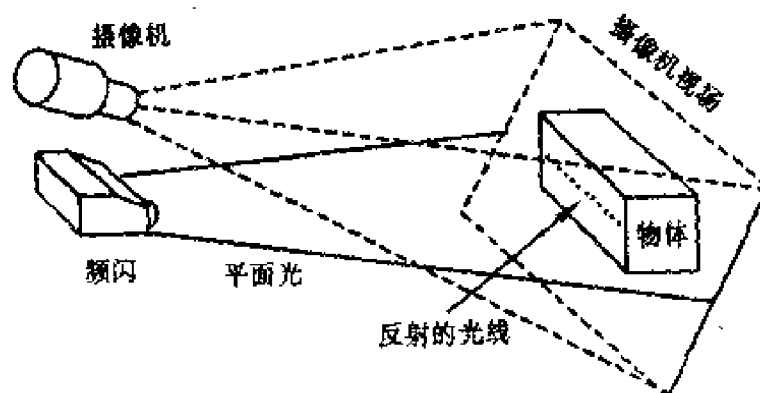


图 27.16 NB 机器人视觉系统的结构光学成像  
(摄像机和频闪装置装在机器人手腕(未示出)  
的相反侧使得平面光平行于抓爪手指。物体出  
现导致摄像机看到一根或更多的线段)

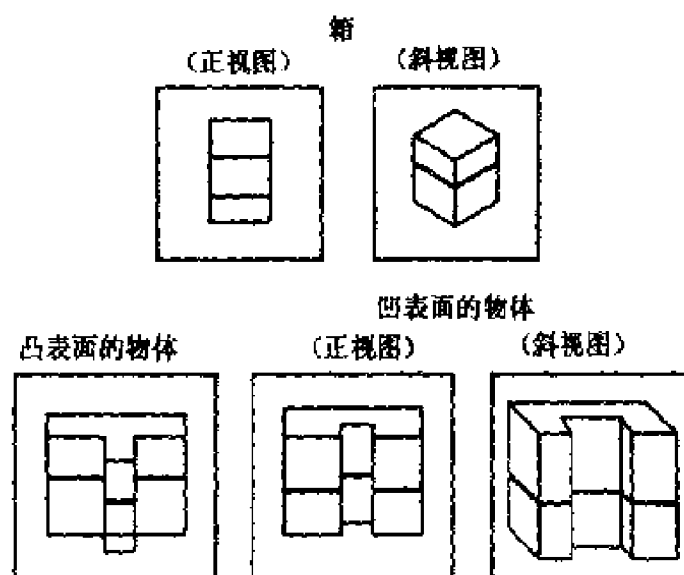


图 27.17 由 NB 视觉系统的摄像机观察到平面  
光形成的物体和线段图形的实例

数据范围,指示物体方向的线的斜率,以及将信息提供给物体边缘  
的线端点使机器人抓握物体。由图 27.19 所示的校准图表可知,物  
体位于离摄像机较远(约 1m)时,系统的分辨率较低,它们相距近  
时分辨率很高。

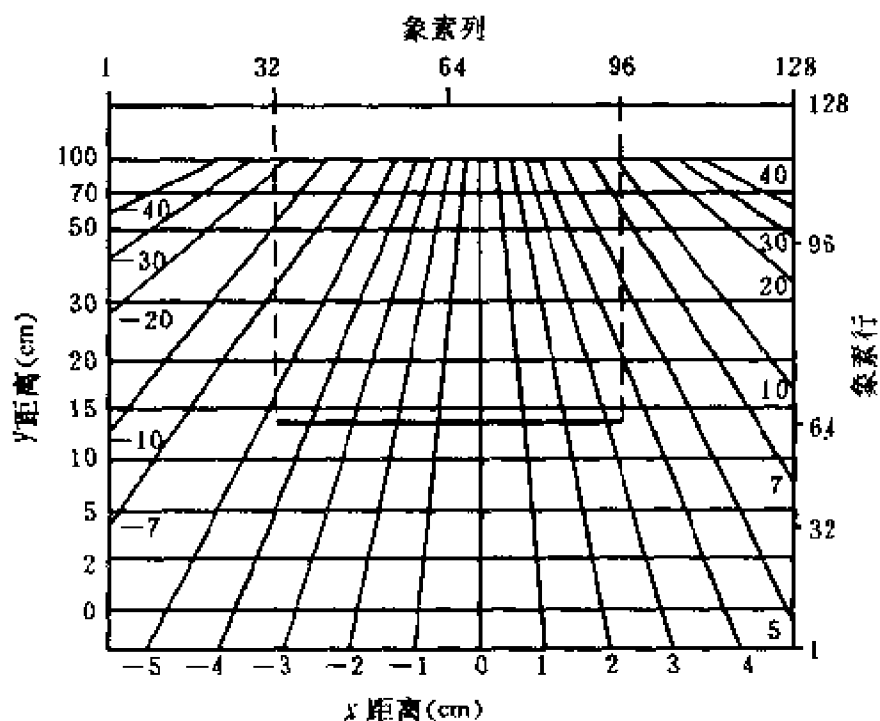


图 27.18 NB 视觉系统用校准图表  $x$  和  $y$  距离是在指的坐标系统中测量的,  $x$  轴通过两个指尖而  $y$  轴平行于腕轴。图中的微倾斜是由于摄像机中底片的不重合造成

在实际应用中,将物体随机放在  $1\text{m}^2$  系统工作空间(例如,工作台上)的动作可分成如下三个连续步骤:

(1) 指令机器人到达位于工作空间一个角落的“终点”位置,然后,工作台在一个与其表面近似平行的平面内由发射闪光装置扫描。照射的物体在图像中表现出一系列线段。通常通过这种处理可得到粗糙的分布信息。

(2) 然后利用上述获得的信息移动机器人臂使之更加靠近物体。频闪光装置再次发射光,从而可获得更多精确的分布信息。因为我们是操纵校准图表中更高分辨率的工件,故摄像机越靠近物体则越提高分辨率。

(3) 根据上面获得的精确分布信息,将机器人臂移动到物体上面(或正前方)。于是,频闪光装置第三次被触发,系统进一步细

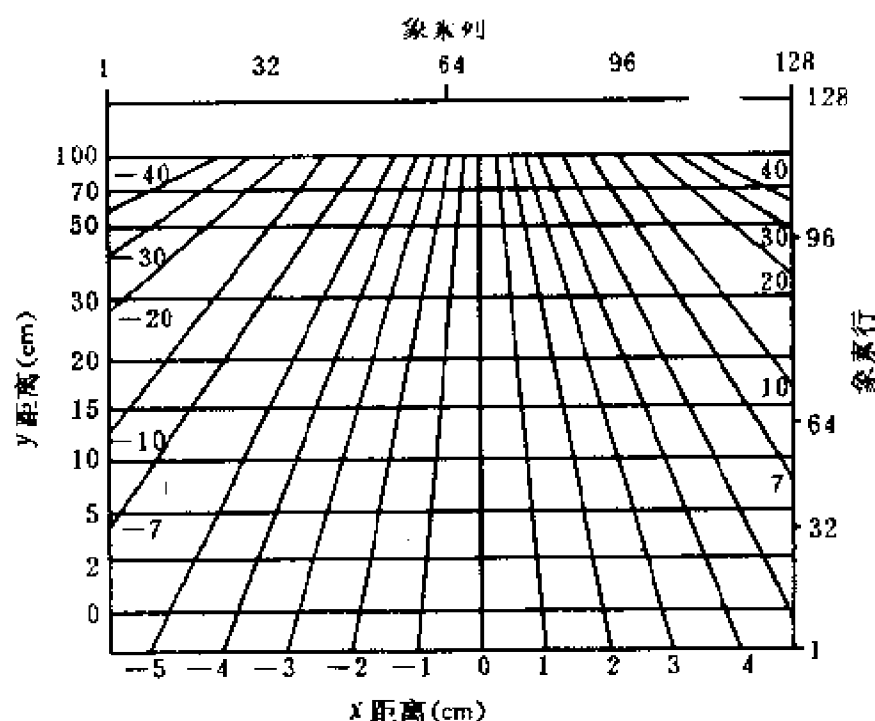


图 27.19 从(32,64)到(96,64)所示线段(图像)的校准图表  
调位置并校正方向。因而可指令机器人抓握物体。

在早期的视觉系统中,每一个照射点都有一个停顿。视觉系统消除这种延时,从而使运动显得较为平滑。现在的处理速度已很快,从而使得系统跟踪运动物体实际上已成为可能的事实。

应该注意的是,NB 系统与其他机器视觉器件基本不同,因为它并不是一直不断地“观察”。在物体信息序列获取过程中由于它只有三幅图像景物需要处理(即处理线段信息),因此,它有更多有效的时间。

除了分布范围和方位数据外,系统还能检测到有关物体结构的信息,图 27.17 中对此作了解释。例如,可以观察到一个表面具有突出部分的物体产生三个不连续的水平线段,这种现象的发生由于与突出部分相关的线段比其他二个线段低。与此类似的是,通过不连续线段的性质和数目可检测到具有凹陷表面的物体。这种图像也表明倾斜地观察物体所产生的线段是连续的但有不同的斜度(即在它们的相交部分有一交点)。此外,还可以看到具有圆柱表

面的物体在被平面光照射时产生弯曲的线段。

除速度外,NB 系统胜过其他系统的另一优点是频闪照射的应用使得对比度问题容易解决。即使物体表面有些暗淡,增加计算机控制下的闪光持续时间有可能补偿二值化时的“阈值”问题,利用 NB 系统的频闪时间可短至  $6.4\mu\text{s}$ ,长至  $1.6\text{ms}$ (在这个范围内分成 256 个值)。环境光干扰可由画面对画面差导致的在相同位置上的照射画面数据与非照射画面数据的对比而获得解决,缺点是需额外的存储器。

在照射处理的每一步骤,使用了与搜索角落和狭缝的算法相对应的单向线。对于产生的每个图像扫描线,系统利用硬件计算 8 位的扫描宽度和 8 位的光强信息(这里利用的灰度信息与前述的 GM 系统不同)。以这一信息为基础从对“工作”线的斜率和曲率信息的分析中可预测下一个扫描线的可能扫描宽度。若实际的扫描宽度(RL)在一个特定的范围  $\epsilon$  内,该点就会被加到工作线上,并可预测出下一个扫描宽度。但如果  $RL > \epsilon$ ,则有下列三种情况:

(1)  $RL = 128$ ,意味着存在一个狭缝,那么该系统开始计算狭缝的宽度。

(2)  $\epsilon < RL < F$ (特定值),意味着前面的点与一角对应(即三面交点),故前面的线终止,而开始用另一条有不同斜率的线进行测量。

(3)  $RL > F$ ,意味着有一个“深度间断”。系统将结束对前一条线的处理并开始计算不连续性。

若未检测到线段,或观察到许多微细的段(根据光强度信息),则可用更高的强度重复照射。另一方面,如果图像过亮,反而导致轮廓不清晰时,可减弱照射光强。显然,计算机可容易地调整光照强度。

虽然对 NB 视觉系统略有改进(例如,计算机系统就有相当的变化),但这种系统仍仅用在美国国家标准局自动化机械厂设计中,至今该系统仍然未能成批生产。



现在,读者对这两种机器人视觉系统有了较好的了解,并能识别两者的相似性和差别。下面介绍 RI 开发的机器人视觉系统。

### 27.5.3 RI 工业视觉系统

第三种机器人视觉系统是由 RI 于 70 年代开发的,它有三个功能:物体分类;由机器人处理材料或工件;工件的视觉检查。这些功能可用于处理传送带上移动的工件。

下面从四个方面介绍 RI 工业视觉系统实现上述三个功能的途径,即照射和成像技术;成像硬件;特征提取;自动识别工件。

#### (1) 照射和成像技术

找出清楚显示重要特征的图像(例如孔眼),可使图像处理快而容易。因此,RI 系统只处理二值化图像,以便使像素仅包含黑色或者白色信息。另外,通过特殊照射应用简单技术即可清楚地指明物体特征,这就是所谓图像反差加强技术,可通过如下三种不同方法实现。

**背景反差** 改进工件和背景之间反差的一种方法是把红色荧光粉敷在传送带上。用紫外线照射皮带时,任何未敷荧光粉的物体在白色背景下会呈现出暗淡的颜色。另一种改进反差的方法是利用背后照射,即将物体放在半透明板上,然后从上面照射物体。这种方法对孔的检测特别有用,但是,这种技术不能用于传送带。

**滤色器** 加强图像的另一种技术是在摄像机透镜前面安装滤色器。该技术只有当物体或背景的颜色(或两者的颜色)已知时才有用。当这种技术与上述荧光系统合并时,红色滤色器与皮带上荧光粉频谱响应匹配能进一步滤去背景,加强图像。

**特殊照射安排** 用不同方法照射物体能控制阴影和高亮度。例如,定向照射能加强阴影而多重定向照射则降低阴影。把照射光源放在摄像机附近能增强亮度(或从光滑表面反射)。反之,利用倾斜照射则有助于降低这种高亮度。这种技术通常称为结构光学照射,它是 RI 系统的重要组成部分。

## (2) 成像硬件

如前所述,RI 系统可以处理传送带上移动的工作。根据前述,皮带敷有红色荧光粉并在摄像机透镜之上装一个滤色器,皮带用紫外光照射。这样,背景和工件之间的反差得到加强,从而有利于识别。

虽然采用标准光导摄像管摄像机能获取传送带上工件的二值化图像,但它没有用于 RI 系统。其原因是尽管在实验阶段可用一个高速 A/D 转换器把 TV 图像量化为具有 32 灰度级(即 5 位亮度)的  $128 \times 128$  个点的图像,但存贮由摄像机扫描的整个图像需要相当巨大的存贮量(即 14K 以上),使得这种技术不切合实际。因此,由 128 个光敏二极管构成的线性阵列摄像机取代光导摄像管摄像机。使用这种装置当传送带移动 1.2mm 时,即可获得由 128 个 1 位的瞬时信号组成的一行线性数据(这种方法和用在 GM Consight 系统中的方法相似)。在皮带移动到下一个位置的过程中,原始数据通过转换成扫描宽度形式而得到压缩,因为这是二值化系统,故只需要处理 8 位信息。从这时起可开始真正的识别处理过程。

## (3) 特征提取

为了识别二极管阵列摄像机扫描的传送带上的工件,必须先提取一组特征。但是,在此之前必须获得物体的轮廓。在 RI 系统中,用连通性分析器检验图像连续行中的信息线之间的重叠,而这又能确定相连接的工件。此外,用这种方式也可发现位于物体边界之内的孔。以上两种情况中都用了标准的界面检测算法。

一旦确定工件轮廓,即可获得初始的或简单的物体特征。在 RI 系统中这些特征包括:

- 表面区域(第一和第二步运动要用到)
- CG-重心(区域)
- 最小惯性矩轴
- 圆周长(由连通性分析器发现的圆周点的狭条获得)

- 由最小封闭矩形确定的物体宽度
- 宽度中心(即长方形中心)

利用上述特征可确定其他特征。例如,RI 系统计算半径函数,也就是,对物体圆周上的每点来说,求出从该点到重心(或宽度中心)的距离的平方值。然后,最大、最小和平均半径值变成重要的特征。

定位特征也可用于确定被拍摄物体的角度方向。也允许直接关注工件轮廓的特殊部分。为此目的人们可利用:

- 用上述方法确定的最大和最小半径
- 角落或槽口(与最大或最小半径函数有关)
- 孔

如图 27.20 所示水泵例中,通过最长半径矢量 OA 和从重心到最近孔 B 形成的矢量 OB 的夹角 AOB 能测量移动水泵把手的位置。

由 RI 系统进行的实际实验中需要 200 条线和用 PDP11-40 来求出泵的轮廓,图像处理时间约 1s。使用快速的计算机,这种处理时间还可缩短很多。



图 27.20 孔为 B,最长半径为 OA 的水泵的二值化图像

#### (4) 自动识别工件

RI 视觉系统的任务是使机器人能定位并抓住传送带上移动的工件。除了对每个外界物体具有完整的特征向量集合外,还应具备有识别影响这种视觉系统可靠地识别物体其他因素的能力。

设计师对任何视觉系统都必须考虑由于下述因素造成图形分类的图像变化:

- 物体旋转
- 物体平移
- 照射光变化
- 摄像机噪声
- 量子误差

物体旋转和平移影响通过测量在理论上与这些因素无关的特征可减到最低限度。例如,位于物体边缘内全部孔的总面积及落入这一范畴的各种半径的统计值。

对上述剩下因素的变化,RI 系统就各种待拍摄物体获得的特征统计值作了重要假设。例如,假设这些特征的变化几乎全部依赖于测量误差。也就是,这些统计量与分类物体无关。当这种假设不是 100% 正确时,也可获得可接受的结果。另一方面,系统还假定对于任何给定特征的条件(与物体有关)的分类分布是标准的。这也不过是近似地正确,但再次产生可接受的结果。除了上述假设外,系统通过根据标准偏离(SD)把每个特征的概率密度归一化,这样即可处理范围很广的物体。

实际执行过程中运用连续识别处理,故可利用判定树法。在产生这种树以前,必须完成几种运算。于是,为了识别每个物体(包括外界物体),我们必须做到:

- 测定预先与特征  $X_1, X_2, \dots, X_N$  一致的  $N$  的分布
- 计算  $\mu_i(j)$ , 即对于第  $j^{\text{th}}$  类的  $i^{\text{th}}$  特征的平均值  $X_i$  (见图 27.21)。

- 对于每个特征  $X_i$ , 将所有物体分成两组,在间隙中间确定一个判定阈值  $\phi$ 。由图 27.21 可看出,对特定的特征  $X_i$ ,将考虑的

五个物体(类 C1 到 C5)分成两组。因此,若一个未知工件的这种特征值的实际值(测量值)小于  $\phi$ , 则物体可能不是 C1、C2, 就是 C3。若特征值大于  $\phi$ , 那么, 则工件很可能是 C4 或 C5。

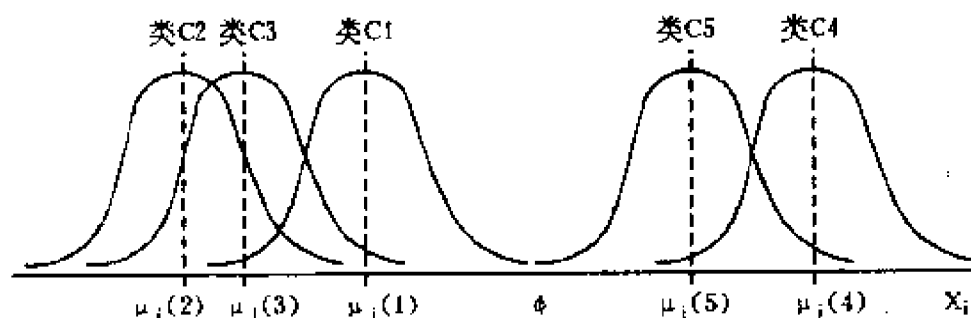


图 27.21 标号 C1 到 C5 的高斯形状分布表示五个物体-组第  $i$  个特征(如周长)的统计分布。 $\phi$  是分类阈值

- 用最大隙缝的值分类  $N$  特征。显然, 隙缝越大, 二进制分段更可靠, 因而识别物体。

- 在实际检测中, 选择测量应是最大隙缝的特征值最大。

上述运算一旦完成, 即可构成判定树并开始实际的检测处理。例如, 我们设想由四个汽车工件(铸件)构成的待识别七个物体的“外界”。其中三个有两个稳定配置, 例如, 一个圆柱形头(见图 27.22 头 1 和头 2), 一个活塞套筒(套筒 1 和套筒 2), 一个盘形制动卡规(卡规 1 和卡规 2)。图中示出的连杆只有一个稳定态。因此, 就系统来说, 需要识别的可能有七个物体。这个实例可用下述七个特征描述:

- $X_1$  = 图的周长
- $X_2$  = 面积的平方根
- $X_3$  = 孔的总面积
- $X_4$  = 最小半径
- $X_5$  = 最大半径
- $X_6$  = 平均半径
- $X_7$  = 紧密度 =  $X_1/X_2$

利用这些特征和根据上述运算的结果, 便可用判定树得到七

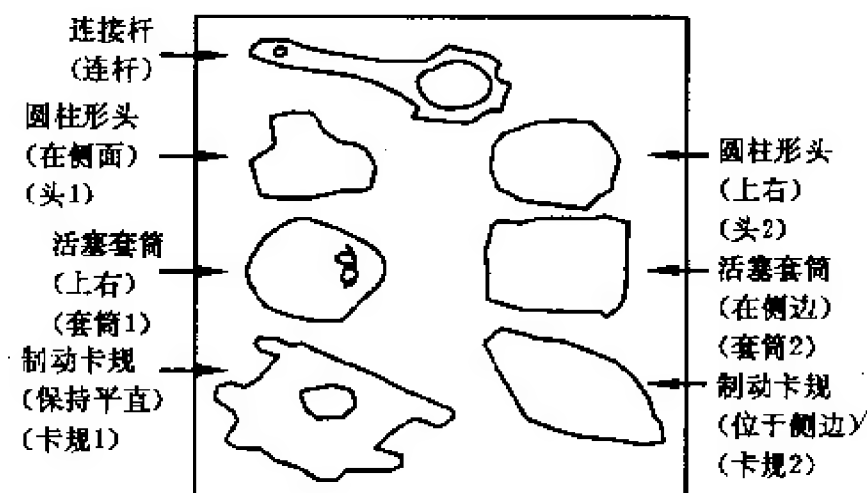


图 27.22 铸件的七种轮廓

种物体。如图 27.23 所示。一旦所检测的物体图像被转换成扫描宽度形式存贮后,系统应当首先寻找  $X_3$  (孔的总面积),接着寻找  $X_1$  (最小半径),然后才继续往下找。有趣的是,对于这种数目较小的物体,只需计算四个特征便可精确地确定哪一个物体是在传送带上。实际上,在 RI 上进行的实验,在 1s 以内能平均完成 2.7 个特征的识别。正如所预料的那样,该系统大部分误差都由较差的二值化图像产生的。

虽然 RI 视觉系统是十多年前开发的,但经稍加改进,迄今仍被 Automatox 公司使用,商品名称为 AUTOVION。

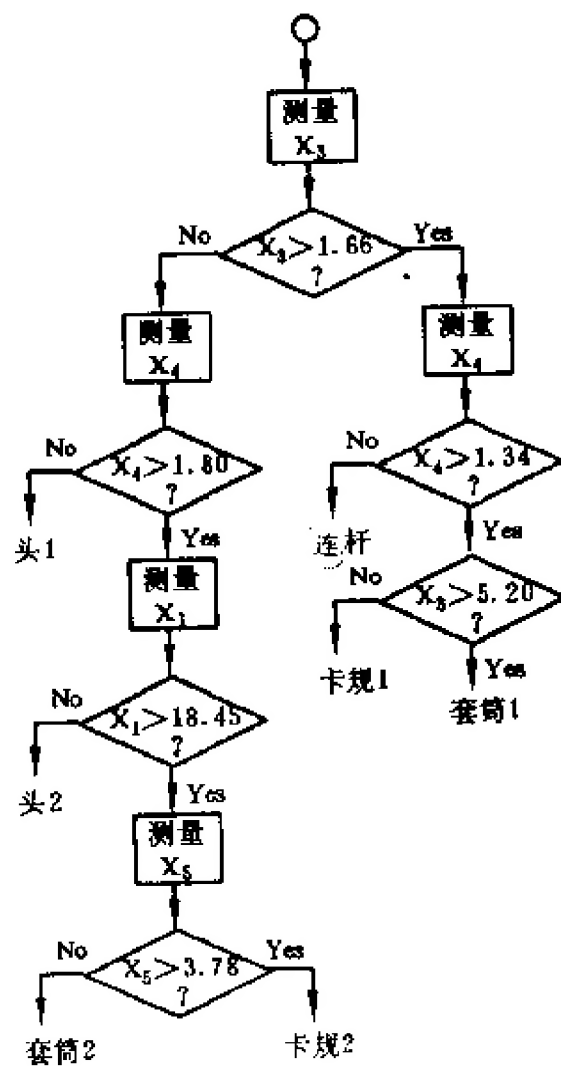


图 27.23 图 27.22 所示七个图像的二值化判定树

## 参考文献

- [1] R. Andrew Russell. Robot Tactile Sensing, 1990 by Prentice Hall of Australia Pty Ltd
- [2] Ben-Zion Sandler. Robotic—Designing the Mechanisms for Automated Machinery, 1991 by PrenticeHall, Inc. A Division of Simon & Schuster Englewood Cliffs, New Jersey 07632
- [3] Richard D. Klasfter. Robotic Engineering—An Integrated Approach, 1989 by Prentice Hall, Inc. A Divisor of Simon & Schuster Englewood cliffs, New Jersey 07632
- [4] NATO ASI Senes. Sensor Devices and Systems for Robotics, Edited by Alicia casals
- [5] 张福学, 孙慷 主编. 压电学(下册), 第一版, 北京, 国防工业出版社 1984.
- [6] 张福学等 编著. 压电铁电应用, 第一版, 北京, 国防工业出版社 1987.
- [7] [美]付京逊, R. C 冈萨雷斯, C. S. G. 李 著; 杨静宁, 李德昌, 李根深等译. 机器人学——控制·传感技术·视觉·智能, 北京, 中国科学技术出版社 1989.
- [8] 张福学 编著. 传感器电子学, 第二版, 北京, 国防工业出版社 1992.
- [9] 张福学 编著. 传感器电子学及其应用, 第一版, 北京, 国防工业出版社 1990.
- [10] 张福学 编著. 传感器应用及其电路精选, 第一版, 北京, 电子工业出版社 1992.
- [11] 张福学 编著. 传感器应用电路 150 例, 第一版, 北京, 中国科学技术出版社 1993.
- [12] 潘荣霖 主编. 飞航导弹惯性器件, 第一版, 北京, 宇航出版社 1990.
- [13] 张福学 著. 压电晶体力和加速度传感器, 第一版, 成都, 四川科学技术出版社 1985.
- [14] [美]Norbert Pawera 著, 黄布华, 胡荣泉 译. 传声器的原理及使用技巧, 第一版, 北京, 新时代出版社 1984.
- [15] [英]M. L. Garford 著, 包紫薇译. 电声学, 第一版, 北京, 科学出版社



1981.

- [16] 李忠华. 电声器件, 第一版, 沈阳, 辽宁科学技术出版社 1989.
- [17] 袁易全著. 超声换能器, 第一版, 南京, 南京大学出版社 1992.
- [18] [日] 世三郎, 江尻正员 主编, 王琪民, 朱近康 译. 机器人工程学及其应用, 第一版, 北京, 国防工业出版社 1989.
- [19] 周远清, 张再兴等 编著. 智能机器人系统, 第一版, 北京, 清华大学出版社 1989.
- [20] [日] 浅居喜代治 编著, 刘高送 译. 现代人机工程学概论, 第一版, 北京, 科学出版社 1992.
- [21] 刘兴良 编著. 机器人基础知识, 第一版, 北京, 新时代出版社 1986.
- [22] 张福学, 李擎. 水下机器人热觉传感器系统, 中国发明专利, 专利号 ZL 94 1 15207.3
- [23] 张福学. 热学传感器, 压电与声光, 1995 年, 第一期, p36
- [24] Zhang Fu-Xue, Li Qing, Su Zhong. A Thermal Sensor For Under Water Robot, ICECM IC-SA'95 Proceedings of International Conference on Electronic Components and Materials Sensors and Actuators, 1995 377 ~378
- [25] 李擎, 张福学, 苏中. 识别物体材质的水下机器人触觉传感器, 电子科技导报, 1995, 第二期, 第 37 页
- [26] 张福学, 陈占先. 气体线加速度传感器, 中国发明专利, 专利号 ZL 92 1 01089.3
- [27] 陈占先, 张福学, 李兴教. 气流式线加速度传感器, 电子科技导报, 1995, 第 2 期, 第 37 页
- [28] 张福学. 气体摆新概念及其应用, 中国学术期刊文摘, 1995, 第 2 期
- [29] 丁衡高. 惯性技术文集, 第一版, 北京, 国防工业出版社 1991.
- [30] 张福学, 张志健. 气体摆式水平姿态传感器, 电子科技导报, 1994 年, 第四期, p29~31
- [31] 张福学, 陈占先. 气体摆式倾角传感器, 信息工程, 1993 年, 第一期, p37 ~40
- [32] 张福学, 陈占先. 气体摆式倾角传感器, 实用新型专利, 专利号 ZL 93 2 16480.3
- [33] Zhang Fu Xue. The Method to Increase Reliability of Piezoelectric Angular

Rate Sensors, Reliability Engineering, 19(1987) 15 ~ 21